

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung



**Aktenzeichen:** 102 54 026.8

**Anmeldetag:** 20. November 2002

**Anmelder/Inhaber:** INCOATEC GmbH, Geesthacht/DE

**Bezeichnung:** Reflektor für Röntgenstrahlung

**IPC:** G 21 K 1/06



**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 17. September 2003  
**Deutsches Patent- und Markenamt**

**Der Präsident**

Im Auftrag

A handwritten signature in black ink, likely of the President of the German Patent and Trademark Office.

Anmelder:

Stuttgart, den 19.11.2002

P8073 B/P

5 INCOATEC GmbH  
Max-Planck-Str. 2  
21502 Geesthacht

Vertreter:

10

Kohler Schmid + Partner  
Patentanwälte GbR  
Ruppmannstraße 27  
D-70565 Stuttgart

15

20

## **Reflektor für Röntgenstrahlung**

25

Die Erfindung betrifft einen Reflektor für Röntgenstrahlung, welcher entlang eines ersten Querschnitts in einer eine x-Richtung enthaltenden Ebene nicht-kreisbogenförmig gekrümmt (tangentielle Krümmung) ist, wobei der Reflektor auch entlang eines zweiten Querschnitts in einer zur x-Richtung senkrechten Ebene gekrümmt ist (sagittale Krümmung).

30

Ein gattungsgemäßer Röntgenspiegel ist beispielsweise aus der DE 44 07 278 A1 bekannt geworden.

Röntgenlicht ist, wie auch sichtbares Licht, eine elektromagnetische Strahlung. Aufgrund der höheren Energie in der Größenordnung von keV ist die Wechselwirkung von Röntgenstrahlung mit Materie aber deutlich anders als bei sichtbarem Licht. Insbesondere haben sich erhebliche Schwierigkeiten gezeigt, wirkungsvolle optische Bauelemente wie Spiegel oder Linsen für Röntgenstrahlung bereitzustellen. Die bisher realisierten Bauelemente basieren in erster Linie auf Bragg-Beugung und Totalreflexion, beides jeweils unter streifendem Einfall.

Ein Röntgenspiegel auf Basis der Bragg-Beugung ist in einer ebenen Ausführung nur zur Reflexion eines sehr geringen Anteils der einfallenden, divergenten Röntgenstrahlung in der Lage, da die Bragg-Bedingung eine vergleichsweise scharfe Einfallswinkelgenauigkeit erfordert. Zur Behebung dieses Problems wurden gekrümmte Spiegelflächen und weiterhin ein örtlich veränderlicher Ebenenabstand vorgeschlagen. Die Krümmung der Spiegeloberfläche sowie der Ebenenabstand sind dabei entlang einer ersten Richtung  $x$ , die etwa der Hauptausbreitungsrichtung der Röntgenstrahlung (bei streifendem Einfall) entspricht, veränderlich. Der lokale Krümmungsradius liegt bei üblichen Dimensionen von Röntgenanalysegeräten im Bereich von Metern und folgt meist einem Parabel- oder Ellipsenprofil. Er ist fertigungstechnisch relativ unproblematisch herzustellen. Zur Realisierung eines veränderlichen Ebenenabstands wurde auf ein Multischichtspiegel-Design zurückgegriffen. Für diese Art eines Röntgenspiegels hat sich die Bezeichnung "Goebel-Spiegel" etabliert, vgl. DE 44 07 278 A1.

Die Reflektivität des Goebel-Spiegels ist aber dadurch begrenzt, dass eine Divergenz des Strahles senkrecht zur  $x$ -Richtung in der Spiegelebene nicht ausreichend berücksichtigt werden kann. Eine zweidimensionale Fokussierung ist zwar durch ein rotationssymmetrisches Design, d.h. eine zweite, kreisbogenförmige Spiegelkrümmung in der Ebene senkrecht zur  $x$ -Richtung

denkbar. Die Krümmung des Spiegels senkrecht zur x-Richtung muss für typische Dimensionen von Röntgenanalyseeinrichtungen bei Krümmungsradien aber im Millimeter-Bereich liegen. Es ist jedoch bisher nicht gelungen, einen solchermaßen stark gekrümmten Röntgenspiegel mit ausreichender

5 Genauigkeit zu fertigen. Eine Schwierigkeit stellt das Reduzieren der Oberflächenrauigkeit und Welligkeit eines so stark gekrümmten Spiegels mit hinreichender Präzision dar. Zum anderen ist es bisher nicht mit vertretbarem Aufwand möglich, Schichtdickenfehler im Bereich großer Krümmungsradien (d.h. am Spiegelrand) bei den gängigen Beschichtungstechniken (Sputtern,

10 Molekularstrahlepitaxie, etc.) für Multischichtspiegel zu vermeiden. Diese Beschichtungsfehler reduzieren die Reflektivität der Röntgenspiegel für die gewünschte Röntgenwellenlänge und tragen Streustrahlung anderer Wellenlängen ein.

15 Um trotzdem eine zweidimensionale Fokussierung zu erreichen, müssen zwei etwa  $90^\circ$  zueinander rotierte, eindimensional fokussierende Goebel-Spiegel in Serie verwendet werden, was erhebliche Intensitätsverluste mit sich bringt.

Einen anderen Mangel von rotationssymmetrischen Göbelspiegel stellt das

20 kreisrunde, ringförmige Strahlprofil der gespiegelten Röntgenstrahlen außerhalb des Brennpunkts dar. Entweder die Probe oder aber der Detektor befinden sich üblicherweise im Brennpunkt, und somit muss entweder der Detektor oder die Probe im Bereich des ringförmigen Strahlprofils angeordnet werden. Dies bringt zum einen Intensitätsverluste mit sich, zum anderen ist der

25 Strahlengang einer solchen Röntgenanalyseeinrichtung durch das ringförmigen Strahlprofil unflexibel.

Es sind auch rotationssymmetrische Totalreflexionsspiegel mit zweidimensionaler Fokussierung bekannt. Totalreflexionsspiegel sind jedoch

30 aufgrund des geringeren Lichtsammelvermögens, des sehr geringen maximalen Einfallswinkels und den damit verbundenen Justierungsschwierigkeiten sowie der fehlenden Monochromatisierung in der Praxis nur in Ausnahmefällen eine Alternative.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es demgegenüber, das Design von Röntgenspiegeln und das Strahlprofil von reflektierter Röntgenstrahlung zu flexibilisieren, die Fertigung von Röntgenspiegeln zu erleichtern und dabei  
 5 gleichzeitig einen hohen Wirkungsgrad (d.h. ein hohes Reflexionsvermögen und gute Fokussierungseigenschaften) der Röntgenspiegel gewährleisten zu können.

Diese Aufgabe wird auf überraschend einfache, aber wirkungsvolle Weise  
 10 durch einen Reflektor für Röntgenstrahlung (Röntgenspiegel) der eingangs vorgestellten Art gelöst, der dadurch gekennzeichnet ist, dass der Reflektor entlang des zweiten Querschnitts ebenfalls eine von einem Kreisbogen abweichende Krümmung aufweist.

Die Krümmung entlang des zweiten Querschnitts (sagittale Krümmung) ist für  
 15 die Fertigung von zweidimensional fokussierenden Spiegeln besonders heikel. Erfindungsgemäß kann diese zweite Krümmung abweichend von der Kreisbogenform gewählt werden. Insbesondere kommen Abweichungen, die die Krümmung des Reflektors entlang des zweiten Querschnitts und speziell im  
 20 Randbereich des Reflektors verringern, besonders in Betracht. Dann können Poliervorgänge, die die Rauigkeit oder Welligkeit der Reflektoroberfläche reduzieren sollen, wesentlich leichter durchgeführt werden.

Außerdem eröffnet eine Abweichung von der rotationssymmetrischen Form  
 25 auch neue Möglichkeiten bei der Ausgestaltung des Strahlprofils des reflektierten Röntgenstrahls außerhalb des Brennpunkts (Fokus). Die kreisrunde Ringform außerhalb des Brennpunkts kann aufgegeben werden. Durch entsprechende Ausgestaltung der Krümmung des erfindungsgemäßen Reflektors entlang des zweiten Querschnitts kann die Strahlform den  
 30 Anforderungen eines speziellen Experiments angepasst werden. Als alternative Strahlformen stehen beispielsweise eine elliptische Ringform oder eine linsenartige Form zur Verfügung. Die Strahlform kann insbesondere der Form

einer zu untersuchenden Probe oder einem Röntgendetektor bzw. dessen Eingangsspalt angepasst werden.

Die Abweichung von Krümmung entlang des zweiten Querschnitts eröffnet  
 5 außerdem die Möglichkeit, Beschichtungsfehler bei Multischichtspiegeln zu tolerieren, ohne Einbußen in der Reflektivität des Röntgenspiegels hinnehmen zu müssen (siehe unten).

Bei einer vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Reflektors  
 10 stellt die Krümmung des Reflektors entlang des zweiten Querschnitts die Fokussiereigenschaften des Reflektors, insbesondere in der zur x-Richtung senkrechten Ebene, ein. Die Krümmung des Reflektors entlang des zweiten Querschnitts bestimmt dann die Richtung der ausgehenden  
 Röntgenstrahlen, die beim Einfall eine Divergenz in der Reflektorebene  
 15 senkrecht zur x-Richtung aufwiesen. Die Fokussierwirkung der Krümmung entlang des zweiten Querschnitts kann insbesondere so gewählt werden, dass die Brennpunkte beider Krümmungen des Reflektors zusammenfallen, zum Beispiel am Detektor oder im Unendlichen für einem Parallelstrahl.

20 Besonders vorteilhaft ist eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Reflektors, bei der der Reflektor zweidimensional fokussierend oder parallelisierend ist. Dadurch kann eine hohe Intensität in einem ausgehenden Röntgenstrahl erhalten werden, denn am erfindungsgemäßen Reflektor ist nur eine verlustverursachende Reflexion zur zweidimensionalen  
 25 Fokussierung oder Parallelisierung eines Röntgenstrahls nötig.

Bei einer weiteren, vorteilhaften Ausführungsform ist der Reflektor so ausgestaltet, dass der Reflektor entlang des ersten Querschnitts (tangente Krümmung) parabelförmig, hyperbelförmig oder elliptisch gekrümmt ist. Die  
 30 Parabelform ist die Grundform des Goebelspiegels und erlaubt eine Parallelisierung des ausgehenden Röntgenstrahls (bezüglich der Strahldivergenz am Reflektor, die die Spiegelfläche in x-Richtung überstreicht). Eine elliptische Form erlaubt eine Fokussierung des Strahls auf

einen bestimmten Brennfleck (wiederum bezüglich der eben erwähnten Divergenz).

Die bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Reflektors ist  
 5 dadurch gekennzeichnet, dass der Reflektor eine periodisch sich  
 wiederholende Folge von Schichten aus Materialien A, B, ... mit  
 unterschiedlichem Brechungsindex aufweist, wobei die Summe  $d = d_A + d_B +$   
 ... der Dicken  $d_A, d_B, \dots$  aufeinanderfolgender Schichten der Materialien A, B,  
 ... sich entlang der x-Richtung stetig, insbesondere monoton ändert. Diese  
 10 Ausführungsform stellt somit weitgehend einen Goebelspiegel dar, wobei sie  
 aber eine nicht-kreisbogenförmige Krümmung entlang des zweiten  
 Querschnitts aufweist. Bisher ist es technisch nicht gelungen, Goebelspiegel  
 mit rotationssymmetrischer zweiter Krümmung in hinreichender Qualität  
 herzustellen. Die obige Ausführungsform ist deutlich leichter herzustellen als  
 15 ein rotationssymmetrischer Goebelspiegel, besitzt aber vergleichbare  
 röntgenoptische Eigenschaften: Die Änderung des Einfallswinkels auf die  
 Multischicht über die Länge des Röntgenspiegels von vorne nach hinten (in  
 x-Richtung) wird in der Bragg-Bedingung durch eine Anpassung des  
 Schichtabstandes (Ebenenabstandes) ausgeglichen, um eine gute  
 20 Reflektivität für die Röntgenstrahlung einer bestimmten Wellenlänge über die  
 gesamte Länge des Röntgenspiegels zu gewährleisten. Die Fokussierung  
 der Strahldivergenz senkrecht zur x-Richtung in der Spiegelebene wird durch  
 die von einer Kreisbogenform abweichende Krümmung entlang des zweiten  
 Querschnitts eingestellt. Im Allgemeinen hat diese Abweichung eine  
 25 unvollkommene Fokussierung zur Folge. Dies kann für bestimmte  
 Anwendungen erwünscht sein und ist daher ausdrücklich Teil der  
 vorliegenden Erfindung.

Die Vorteile der Erfindung kommen bei einer Weiterbildung dieser  
 30 Ausführungsform aber besonders gut zur Geltung, die dadurch  
 gekennzeichnet ist, dass die Summe  $d$  sich entlang des zweiten  
 Querschnitts ändert, insbesondere um mehr als 2%. Die Änderung in der  
 Summe  $d$  entlang des zweiten Querschnitts ist ein nahezu unvermeidbarer

Fehler bei der Beschichtung von stark gekrümmten Oberflächen. Im Randbereich des Reflektors ist die Krümmung besonders stark und infolgedessen erreicht die dort Schichtdicke bei üblichen Beschichtungsverfahren nur eine geringere Dicke wie an ungekrümmten, ebenen Stellen. Wenn aber die Schichtdicke sich verändert, muss, um die Bragg'sche Gleichung weiterhin zu erfüllen und damit ausreichende Reflektivität bei einer bestimmten Wellenlänge gewährleisten zu können, der Einfallswinkel der Strahlung angepasst werden. Der Einfallswinkel ist aber eine Funktion der lokalen Krümmung des Reflektors. Bei Kenntnis der Krümmungsabhängigkeit der Beschichtungsdicke (etwa durch Modellrechnung, sie Detailbeschreibung, oder experimentelle Bestimmung) kann somit über eine gezielte vorherige Einstellung der Krümmung des Spiegels das tatsächliche Reflexions- und Fokusverhalten des fertigen Multischicht-Reflektors bestimmt und somit eingestellt werden.

Besonders vorteilhaft ist eine Ausgestaltung dieser Weiterbildung, bei der der Reflektor dadurch gekennzeichnet ist, dass die Krümmung des Reflektors entlang des zweiten Querschnitts die Änderung der Summe  $d$  entlang des zweiten Querschnitts gegenüber einem Vergleichsreflektor mit einer konstanten Summe  $d$  und kreisförmiger Krümmung entlang dessen zweiten Querschnitts bezüglich der Fokussierungs- und Reflektivitätseigenschaften des Reflektors kompensiert. Durch diese Ausgestaltung wird ein röntgenoptisches Bauteil realisiert, dessen Eigenschaften einem rotationssymmetrischen Göbelspiegel entsprechen. Ein funktionsfähiger, rotationssymmetrischer Goebelspiegel konnte experimentell noch nicht realisiert werden. Diese erfindungsgemäße Ausgestaltung ist aber leichter herzustellen, da die Krümmung entlang des zweiten Querschnitts reduziert ist und außerdem die unvermeidlichen Schichtdickenfehler toleriert werden können.

Eine andere vorteilhafte Ausführungsform sieht vor, dass der Reflektor entlang des zweiten Querschnitts eine elliptische Krümmung mit unterschiedlichen Längen der Halbachsen oder eine parabelförmige



Krümmung aufweist. Die elliptische Bauweise ist besonders geeignet zur Fokussierung der Divergenz der Strahlung senkrecht zur x-Achse in der Spiegelebene; die Parabelform begünstigt die Ausbildung eines Parallelstrahls.

5

Bei einer vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Reflektors weist der Reflektor eine reflektierende Oberfläche von mehr als 2 mm, insbesondere mindestens 4 mm Breite (gemessen senkrecht zur x-Richtung) auf. Bei herkömmlichen rotationssymmetrischen Goebelspiegeln nimmt die Reflektivität für eine bestimmte Wellenlänge zum Rand hin ab; insbesondere sind bei üblichen Dimensionen eines Röntgenanalysegeräts reflektierende Breiten auf unter 2 mm begrenzt. Der erfindungsgemäße Reflektor besitzt aber hohe Reflektivität über weitaus größere Breiten. Dadurch kann die reflektierte Intensität in erster Näherung erfindungsgemäß proportional zur reflektierenden Fläche gesteigert werden.

In den Rahmen der vorliegenden Erfindung fällt auch ein Röntgenanalysegerät mit einer Röntgenquelle, einer zu analysierenden Probe, einem Röntgendetektor, strahlformenden und/oder strahlbegrenzenden Mitteln und einem obigen, erfindungsgemäßen Reflektor. Der erfindungsgemäße Reflektor kommt besonders gut zur Geltung, wenn er in einer Röntgenanalysevorrichtung eingesetzt wird. Die Röntgenquelle kann neben einer Röntgenröhre auch noch einen separaten Monochromator umfassen. Die Probe kann auf einem Goniometer gelagert sein. Der Detektor kann energieauflösend ausgestaltet sein oder auch integral ereigniszählend.

In einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Röntgenanalysegeräts trifft Röntgenstrahlung auf dem Reflektor in einem Winkel von weniger als  $5^\circ$  zur x-Richtung auf. Unter diesen Bedingungen ist die Bragg-Beugung besonders effektiv, da bei üblicher Röntgenstrahlung im Bereich einiger keV (z.B. Cu-K $\alpha$ ) der zugehörige Schichtabstand technologisch gut zu fertigen ist.

Bei einer anderen, vorteilhaften Ausführungsform ist die Krümmung des Reflektors entlang des zweiten Querschnitts so ausgebildet ist, dass die Reflektivität des Reflektors für die Wellenlänge der von der Röntgenquelle erzeugten Strahlung maximal ist. Dadurch werden hohe reflektierte Intensitäten und damit kürzere Messzeiten im Röntgenanalysegerät erreicht. Insbesondere können auch verschiedene Reflektoren speziell für bestimmte Röntgen-Wellenlängen austauschbar vorgesehen sein.

Besonders vorteilhaft ist eine Ausführungsform, bei der der Reflektor auf ihn einfallende Röntgenstrahlung auf einen punktförmigen Bereich (Brennfleck), insbesondere auf die Probe oder auf den Röntgendetektor fokussiert. Dies sind die häufigsten Anwendungsfälle für einen Strahlengang, bei denen die Zählrate am Detektor maximiert wird.

Ebenfalls vorteilhaft ist eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Röntgenanalysegeräts, bei dem der Reflektor aus auf ihn einfallender Röntgenstrahlung einen Röntgenstrahl mit einer bestimmten Strahldivergenz, insbesondere einen Parallelstrahl, erzeugt. Mit parallelen Röntgenstrahlen können Proben besonders gleichmäßig ausgeleuchtet werden, und ein ähnliches Strahlprofil kann an der Probe und am Detektor eingestellt werden.

Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der Zeichnung. Ebenso können die vorstehend genannten und die noch weiter ausgeführten Merkmale erfindungsgemäß jeweils einzeln für sich oder zu mehreren in beliebigen Kombinationen Verwendung finden. Die gezeigten und beschriebenen Ausführungsformen sind nicht als abschließende Aufzählung zu verstehen, sondern haben vielmehr beispielhaften Charakter für die Schilderung der Erfindung.

Die Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert. Es zeigen:

- Fig. 1a ein erfindungsgemäßes Röntgenanalysegerät mit schematischer Darstellung einer Strahldivergenz, die einen erfindungsgemäßen Reflektor in x-Richtung überstreicht;
- 5 Fig. 1b das Röntgenanalysegerät von Fig. 1a mit schematischer Darstellung einer Strahldivergenz, die den Reflektor in Spiegelebene senkrecht zur x-Richtung überstreicht;
- 10 Fig. 2a den erfindungsgemäßen Reflektor von Fig. 1a sowie einen ersten Querschnitt in einer die x-Richtung enthaltenden Ebene;
- Fig. 2b den erfindungsgemäßen Reflektor von Fig. 1a sowie einen zweiten Querschnitt in einer zur x-Richtung senkrechten Ebene;
- 15 Fig. 3 einen Querschnitt durch einen rotationssymmetrischen Reflektor (Stand der Technik);
- Fig. 4 einen Querschnitt durch einen erfindungsgemäßen, nicht-rotationssymmetrischen Reflektor;
- 20 Fig. 5 den Aufbau eines Einkristalldiffraktometers für die Proteinkristallographie nach dem Stand der Technik;
- 25 Fig. 6 das Strahlbild eines rotationssymmetrischen fokussierenden Reflektors im Bildfokus und außerhalb des Bildfokus (Stand der Technik);
- Fig. 7 das Strahlbild eines Segments eines zweidimensional fokussierenden Reflektors im Bildfokus und vor dem Bildfokus (Stand der Technik);
- 30

- Fig. 8 einen Ausschnitt aus einem rotationsellipsoidförmigen fokussierenden Reflektor (Stand der Technik)
- Fig. 9 den Höhenverlauf des Reflektors von Fig. 8 entlang x;
- 5 Fig. 10 den Höhenverlauf des Reflektors von Fig. 8 entlang y;
- Fig. 11 den lokalen Neigungswinkel der Reflektoroberfläche des Reflektors von Fig. 8 gegen die y-Achse bei  $x=90\text{mm}$ ;
- 10 Fig. 12 einen Aufbau einer herkömmlichen Beschichtungsvorrichtung zum Beschichten eines Reflektors ohne Vermeidung von Beschichtungsfehlern (Stand der Technik);
- 15 Fig. 13 den Verlauf der relativen Beschichtungsdicke (Beschichtungsfehler) an der Reflektoroberfläche des Reflektors von Fig. 8 in y-Richtung bei  $x=90\text{mm}$ ;
- Fig. 14a die Reflektivität über die Fläche eines rotationsellipsoidförmigen Reflektors mit Abmessungen  $60 \times 4 \text{ mm}$  unter Annahme eines  $\cos(\beta)$ -Beschichtungsfehlers für Cu-K $\alpha$ -Strahlung;
- 20 Fig. 14b die Reflektivität über die Fläche eines rotationsellipsoidförmigen Reflektors mit Abmessungen  $60 \times 4 \text{ mm}$  unter Annahme eines  $\cos(\beta)$ -Beschichtungsfehlers für Cu-K $\beta$ -Strahlung;
- 25 Fig. 15 einen Aufbau einer Beschichtungsvorrichtung zum homogenen Beschichten eines Reflektors;
- 30 Fig. 16 erfindungsgemäße Kompensationskurve eines  $\cos(\beta)$ -Beschichtungsfehlers durch ein nicht-rotationssymmetrisches Ellipsoid.

Die Fig. 1 zeigt den Aufbau eines erfindungsgemäßen Röntgenanalysegeräts in schematischer Darstellung. Von der Röntgenquelle 1 geht Röntgenstrahlung aus. Von dieser Röntgenstrahlung sind in Fig. 1a zwei Strahlenbündel 2 und 3 gezeigt. Beide Strahlenbündel 2, 3 passieren eine Lochblende 4 und treffen auf die reflektierende Oberfläche des erfindungsgemäßen Reflektors 5. Mit dem Reflektor 5 gekoppelt ist ein orthogonales Koordinatensystem X, Y, Z. Der Reflektor ist ein Gradienten-Vielschichtspiegel. Die reflektierende Oberfläche wird durch eine in Z-Richtung periodische Abfolge von mindestens zwei

10 Schichten aus Materialien A, B mit unterschiedlichem Brechungsindex für die verwendete Röntgenstrahlung gebildet. Die jeweiligen Schichten erstrecken sich also ungefähr in benachbarten XY-Ebenen. Die reflektierende Oberfläche des Reflektors 5 ist in zwei Dimensionen gekrümmt (siehe dazu Fig. 2a und Fig. 2b). Erfindungsgemäß sind beide Krümmungen nicht kreisbogenförmig.

15

Die Strahlenbündel 2, 3 werden am Reflektor 5 reflektiert, durchdringen die Probe 6 und werden im Röntgendetektor 7 registriert.

Die Strahlenbündel 2, 3 besitzen eine Divergenz 8 in der XZ-Ebene von typischerweise  $0,2 - 2^\circ$ . Der Einfallswinkel 9 der beiden Strahlenbündel 2, 3 beträgt dabei etwa  $0,5 - 2,5^\circ$  gegen die X-Richtung bzw. die X'-Richtung (der Einfallswinkel 9 ist in Fig. 1a und auch Fig. 1b zur Veranschaulichung überzeichnet dargestellt). Die X-Richtung ist die Haupterstreckungsrichtung des Reflektors 5. Vom Einfallswinkel 9 abgesehen stimmt also die Einstrahlrichtung der Röntgenstrahlung auf den Reflektor 5 mit der X-Richtung überein.

25

Die Divergenz 8 der einfallenden Röntgenstrahlung in der XZ-Ebene wird durch die Krümmung des Reflektors entlang seines ersten Querschnitts (tangentielle Krümmung) in einer XZ-Ebene, also einer die x-Richtung enthaltenden Ebene, fokussiert (vgl. Fig. 2a). Die Krümmung des Reflektors entlang des ersten

30 Querschnitts ist in Fig. 1a parabelförmig.

**Fig. 1b** zeigt dasselbe Röntgenanalysegerät wie **Fig. 1a**, allerdings mit zwei anderen Strahlenbündeln 10 und 11. Beide Strahlen besitzen eine Divergenz 12 in der YZ-Ebene. Die Größenordnung dieser Divergenz 12 liegt bei etwa 1 - 2°. Die Strahlenbündel 10, 11 werden an der Oberfläche des Reflektors 5  
 5 gespiegelt, durchdringen die Probe 6 und werden im Detektor 7 registriert.

Die Divergenz 12 der einfallenden Röntgenstrahlung in der YZ-Ebene wird durch die Krümmung des Reflektors entlang eines zweiten Querschnitts (sagittale Krümmung) in einer YZ-Ebene, also der zur x-Richtung senkrechten  
 10 Ebene, fokussiert (vgl. **Fig. 2b**). Anders als beim bekannten Goebel-Spiegel besitzt der dargestellte, erfindungsgemäße Reflektor 5 entlang des zweiten Querschnitts eine nicht-kreisbogenförmige, nämlich näherungsweise eine elliptische Krümmung.

15 Die Krümmung des Reflektors 5 wird in den **Figuren 2a und 2b** veranschaulicht. Beide Figuren zeigen den Reflektor 5 von **Fig. 1a/b** jeweils vergrößert. Die Schnittlinie 13 der reflektierenden Oberfläche des Reflektors 5 mit der XZ-Ebene (welche die X-Richtung enthält), offenbart die Krümmung des Reflektors in einer ersten Dimension. In **Fig. 2a** ist diese Krümmung als  
 20 parabelförmig zu erkennen. Diese erste Krümmung stellt die Krümmung des Reflektors entlang des ersten Querschnitts dar.

Die Schnittlinie 14 der reflektierenden Oberfläche des Reflektors 5 mit der YZ-Ebene offenbart die Krümmung des Reflektors in einer zweiten Dimension. In  
 25 **Fig. 2b** ist diese Krümmung als elliptisch zu erkennen. Diese zweite Krümmung stellt die Krümmung des Reflektors entlang des zweiten Querschnitts dar und ist erfindungsgemäß nicht kreisbogenförmig. Im dargestellten Fall, und allgemein auch vorteilhaft für die Erfindung, ist die Reflektoroberfläche spiegelsymmetrisch bezüglich einer zentralen XZ-Ebene ausgestaltet, um einen  
 30 gleichmäßig ausgeleuchteten reflektieren Röntgenstrahl zu erhalten.

Im folgenden wird die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Konditionierung von Röntgenstrahlen durch zweidimensional gekrümmte Röntgenreflektoren, insbesondere Vielfachschicht-Röntgenreflektoren, mit nicht-rotationssymmetrischer Form im Detail erläutert.

5

- Reflektoren, die mit einer Vielfachschicht („Multilayer“) versehen sind, finden seit einigen Jahren Verwendung zur Konditionierung von Röntgenstrahlen in verschiedenen Röntgenanalyseinstrumenten. Diese Multilayer bestehen typischerweise aus einigen zehn bis einigen hundert alternierenden
- 10 Einzelschichten aus zwei oder mehr Materialien, mit Einzelschichtdicken von typisch 1 – 20 nm. Mit diesen Multilayern werden auftreffende Röntgenstrahlen entsprechend der Bragg’schen Gleichung durch den Effekt der Beugung umgelenkt und monochromatisiert. Die Reflektivität dieser Multilayer kann für Röntgenstrahlen sehr hoch sein; Reflektivitäten von bis zu 90 % wurden
- 15 theoretisch vorhergesagt und in den letzten Jahren durch kontinuierliche Verbesserungen der zur Herstellung verwendeten Beschichtungstechnologien auch experimentell erreicht („Röntgenspiegel“). Bei realen, räumlich ausgedehnten Röntgenquellen (im Gegensatz zu nicht existierenden, idealen Punktquellen) reduzieren sich die Reflektivitäten je nach Quellgröße auf
- 20 typischerweise 30 – 70 %. Für den Einsatz im Bereich harter Röntgenstrahlung (Wellenlängen typisch 0.05 – 0.25 nm) sind die Ablenkwinkel typisch im Bereich zwischen 0.5 – 2.5 Grad, es handelt sich also um Anwendungen im Bereich des streifenden Einfalls.
- 25 Wesentliche Verbesserungen derartiger Röntgenreflektoren wurden z.B. durch US 6,226,349 sowie [M. Schuster, H. Göbel, L. Brügemann, D. Bahr, F. Burgäzy, C. Michaelsen, M. Störmer, P. Ricardo, R. Dietsch, T. Holz, and H. Mai, “Laterally graded multilayer optics for x-ray analysis”, *Proc. SPIE* **3767**, pp. 183-198, 1999] erreicht, indem die Reflektoren in einer Dimension (parabolisch,
- 30 elliptisch, etc.) gekrümmt wurden. Die Anforderungen an die Formtreue dieser Reflektoren sind hoch, und liegen im Bereich deutlich unter 1 Mikrometer. Um für derartige Reflektoren an allen Stellen des Reflektors hohe Reflektivität zu erhalten, müssen die Multilayer-Beschichtungen in sehr definierter Weise über

die Fläche des Reflektors variieren, gemäß den Angaben z.B. von US 6,226,349 und [Veröff. Schuster s.o.]. Die Anforderungen an die Präzision der Beschichtung derartiger Reflektoren sind außerordentlich hoch, und betragen typischerweise 1 - 3 % der Einzelschichtendicken. Diese Toleranzen ergeben sich aus den Breiten der Multilayer-Braggreflexe, die typischerweise im Bereich 1 – 3 % des Braggwinkels liegen. Damit ergeben sich Anforderungen an die Beschichtung, die typisch im Bereich einiger zehn Pikometer liegen. Trotz dieser extremen Anforderungen ist die Herstellung derartiger Reflektoren in den letzten Jahren mit verschiedenen Methoden geglückt, und diese Reflektoren sind seit einigen Jahren ein kommerziell erhältliches Produkt.

Da diese Reflektoren bei kleinen Einstrahlwinkeln betrieben werden, sind die Abweichungen der Form von einer ebenen Form typisch klein, und liegen im Bereich einiger zehn Mikrometer, die Krümmungsradien liegen typisch bei einigen Metern, makroskopisch gesehen sind die Reflektoren also im wesentlichen flach. Für die Beschichtung dieser makroskopisch flachen Reflektoren ergeben sich daher gegenüber ebenen Reflektoren keine weiteren Probleme aufgrund der Krümmung der Reflektoren. Aus Sicht der Beschichtung sind diese Reflektoren i.w. plan.

Zweidimensional gekrümmte, rotationssymmetrische Reflektoren (Rotationsellipsoid, Rotationsparaboloid etc. oder Segmente dieser Formen), auch mit Multilayern beschichtet, sind für Röntgenstrahlen zwar vielfach vorgeschlagen worden, z.B. US 4,525,853, US 4,951,304, US 5,222,113, sie wurden jedoch niemals realisiert. Gründe hierfür sind die enormen technischen Probleme bei der Beschichtung (gemäß US 6,226,349 tangential variierend, und gleichzeitig extrem homogen (1 - 3 %) in der Querrichtung, in der die Optik nun auch gekrümmt ist). Dies liegt im wesentlichen darin begründet, dass diese Reflektoren tangential im wesentlichen wieder flach (Krümmungsradien im Meterbereich), senkrecht dazu (sagittal) aber stark gekrümmt sein müssen, mit Krümmungsradien typisch im Bereich nur einiger Millimeter. Dies liegt wieder daran, dass die Reflektoren bei kleinen Einstrahlwinkeln betrieben werden. Damit ergeben sich, zusätzlich zu der Notwendigkeit einer tangential extrem



präzisen Beschichtung (entsprechend US 6,226,349), in Querrichtung erhebliche Neigungswinkel und daraus resultierende Beschichtungsfehler. Die Reflektoren sind nicht mehr flach, sondern makroskopisch gekrümmt. Da sich bei den typischerweise verwendeten Beschichtungsverfahren die Schichtdicken mit dem Neigungswinkel zur Beschichtungsquelle verändern, ist die zusätzliche Forderung an eine in Querrichtung homogene Schichtdicke, wieder im Bereich einiger zehn Pikometer, eine zusätzliche technologische Herausforderung. Die erforderliche Beschichtung wurde bisher nicht erreicht.

- 10 Daher sind zweidimensional kollimierende bzw. fokussierende Multilayer-Röntgenreflektoren bisher nur entsprechend US 6,014,423 und US 6,014,099 und früheren Arbeiten [M. Montel, *X-ray Microscopy and Microradiography*, Academic Press, New York, pp. 177 – 185, 1957; V. E. Cosslett and W. C. Nixon, *X-Ray Microscopy*, Cambridge, At The University Press, p. 108 ff, 1960; 15 *Encyclopedia of Physics*, ed. S. Flügge, Vol. XXX: *X-Rays*, Springer Berlin, p. 325 ff, 1957; Kirkpatrick-Baez, siehe z. B. Fig. 1 in US 6,041,099] durch die Kombination zweier makroskopisch i.w. flacher Reflektoren, also durch eine Doppelreflexion realisiert worden. Da hier mindestens zwei Reflektoren verwendet werden müssen, und diese sehr präzise zueinander ausgerichtet werden müssen, ergeben sich erhöhte Kosten und ein erhöhter Justieraufwand. 20 Hinzu kommt der Intensitätsverlust bei Verwendung zweier Reflektoren. Da selbst die besten Multilayer-Reflektoren insbesondere beim Einsatz mit ausgedehnten Röntgenquellen (z.B. Drehanoden) mit zunehmender Ausdehnung der Quellen deutlich an Effektivität verlieren, sind Intensitätsverluste von 50 % pro Reflektion durchaus normal. Dennoch sind 25 diese Reflektoren die bisher einzigen zweidimensional kollimierenden bzw. fokussierenden Multilayer-Röntgenreflektoren nach dem Stand der Technik.

- Zweidimensional kollimierende bzw. fokussierende, rotationssymmetrische 30 Röntgenreflektoren mit sagittalen Krümmungsradien im Millimeterbereich gibt es daher bisher nur als Totalreflektionsspiegel (z.B. WO 0138861, oder MICROMIRROR TM Bede Scientific). Hierbei sind nur sehr geringe Anforderungen an die Beschichtung (es ist nur eine Einzelschicht erforderlich,

z.B. Gold, und die Schicht muss nur ausreichend dick sein,  $> \text{ca. } 30 \text{ nm}$ , eine homogene Schichtdicke ist nicht erforderlich), und gegenüber einem Multilayer-Reflektor wesentlich geringere Anforderungen an die Mikrorauigkeit des Reflektors zu erfüllen (für Totalreflexion  $\text{ca. } 1 \text{ nm}$ , Multilayerspiegel benötigen demgegenüber gemäß US 6,226,349 eine Rauigkeit  $< 0.3 \text{ nm}$ ).

Totalreflektoren haben jedoch gegenüber Multilayer-Reflektoren mehrere wesentliche Nachteile: die noch geringeren Einstrahlwinkel (etwa dreimal kleiner) und das dadurch bedingte geringere Lichtsammelvermögen, und den Mangel an monochromatisierender Wirkung von totalreflektierenden Spiegeln. Totalreflektoren haben keine monochromatisierenden Eigenschaften, sondern unterdrücken nur hochenergetische Röntgenstrahlen, für die der Totalreflektionswinkel bei gegebener Geometrie überschritten wird.

Aus diesen Gründen ist es äußerst wünschenswert, verbesserte Methoden und Verfahren zur Herstellung zweidimensional kollimierender bzw. fokussierender, multilayerbeschichteter Röntgenreflektoren zur Verfügung zu stellen.

Erfindungsgemäß wird dies dadurch erreicht, dass man nicht-rotationssymmetrische, zweidimensional gekrümmte, multilayerbeschichtete Körper verwendet. Die Vorteile, die sich aus der Aufgabe der Nebenbedingung der Rotationssymmetrie ergeben, sind nicht offensichtlich erkennbar, und werden daher in den folgenden Beispielen beschrieben.

Zunächst hat der Wechsel von einem rotationssymmetrischen zu einem nicht-rotationssymmetrischen Reflektor einen Nachteil. Dies ist in den **Figuren 3 und 4** am Beispiel eines fokussierenden Reflektors dargestellt. Während bei rotationssymmetrischen Reflektoren 30 (Fig. 3) der Querschnitt kreisförmig ist und alle Strahlen 31 senkrecht zur Tangente wieder in einen Punkt 32 gespiegelt werden, ist dies bei nicht-rotationssymmetrischen Reflektoren 40 (Fig. 4) nicht der Fall. Nicht-rotationssymmetrische Reflektoren haben also einen Verlust an Fokussierung zur Folge. Die freie Wahl des Querschnitts eröffnet aber einige zusätzliche Möglichkeiten, wie im Folgenden exemplarisch erläutert. Wichtig ist (wie Rechnungen zeigen), dass der Verlust an

Fokussierung nur horizontal (in der Breite), nicht aber vertikal (in der Höhe) auftritt. Dies liegt darin begründet, dass bei den betrachteten Reflektoren das Vergrößerungsverhältnis (Quellgröße zu Bildgröße) praktisch unabhängig von der Wahl der Querschnittsform des Reflektors ist. Diese überraschende  
 5 Eigenschaft ist letztendlich auf die hohe Exzentrizität der hier relevanten Reflektoren zurückzuführen (wie unten beschrieben).

In **Fig. 5** ist eine typische Anwendung (ein sog. Einkristalldiffraktometer) gezeigt. Das aus einer Röntgenquelle 51 (mit Lochblende 200  $\mu\text{m}$ )  
 10 ausgesendete Röntgenlicht 52 wird mit Hilfe eines rotationssymmetrischen Reflektors 53 (z.B. MICROMIRROR) auf den zweidimensionalen Detektor 54 fokussiert. Aufgrund der endlichen Ausdehnung der Röntgenquelle (z.B. 0.1 mm Durchmesser) ist das Strahlbild im Bildfokus 61, siehe **Fig. 6**, auch typisch einige 0.1 mm groß. Die Probe 55 mit Durchmesser von typisch 0.5 mm  
 15 Durchmesser befindet sich typischerweise 10 cm vor dem Detektor 54. Dort ist das Strahlbild 62 jedoch ringförmig. Dies führt dazu, dass die Probe 54 nicht optimal ausgeleuchtet wird. Analog dazu ist es von Nachteil, wenn die Probe im Fokus platziert ist, da dann das Streubild im Detektor nicht punktförmig ist. Das grundsätzlich ringförmige Strahlprofil 62 außerhalb des Bildfokus ist generell  
 20 von Nachteil.

Daher ist es ausreichend, oder sogar von Vorteil, für derartige Anwendungen nur einen Teil (nur ein Segment) des gesamten Reflektors zu verwenden. Wie in **Fig. 7** dargestellt ist für solch einen Ausschnitt des Reflektors das Strahlbild  
 25 sowohl im Fokus 71 (Detektor) als auch außerhalb des Fokus 72 (Probe) ähnlich groß. Bei geeigneter Wahl des Reflektors wie auch der Größe des Reflektorausschnitts werden Strahlabbildungen erreicht, die ideal sind für die Anwendung.

30 Im Folgenden wird exemplarisch ein ellipsoider Reflektorausschnitt 81 entsprechend Fig. 8 näher spezifiziert. Die Form des Ellipsoids 82 wird beschrieben durch

$$\frac{(x - a)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

Für den Fall  $b = c$  ergibt sich ein rotationssymmetrisches Ellipsoid mit kreisförmigem Querschnitt (Stand der Technik). Für  $b \neq c$  ergibt sich ein  
 5 erfindungsgemäßes nicht-rotationssymmetrisches Ellipsoid mit elliptischem Querschnitt (erfindungsgemäß sind jedoch beliebige Querschnittsformen möglich). Typische Werte für  $a$ ,  $b$  und  $c$  sind  $a = 250$  mm,  $b = 5$  mm, und  $c = 5$  mm. Damit ergibt sich ein Abstand zwischen Quelle und Bildfokus von  $2a = 500$  mm und ein maximaler Durchmesser des Reflektors  $2b = 10$  mm. Wie bereits  
 10 oben beschrieben ergibt sich die Notwendigkeit des kurzen Krümmungsradius in der  $y$ - $z$ -Ebene aus der Nebenbedingung der kleinen Einfallswinkel.

In den **Figuren 9 und 10** sind die entsprechenden Höhenprofile entlang  $x$  und  $y$  gezeigt, für einen 4 mm breiten Reflektorausschnitt. Die Kurven entlang  $x$   
 15 gemäß Fig. 9 sind i.w. flach und haben eine Falltiefe (in  $z$ -Richtung) von einigen zehn Mikrometern über eine Länge von einigen zehn Millimetern, haben also einen großen Krümmungsradius von typisch einigen Metern. Die Kurven entlang  $y$  gemäß Fig. 10 sind makroskopisch gekrümmt und haben eine Falltiefe von einigen hundert Mikrometern über eine Breite von 4 mm, besitzen  
 20 also einen kleinen Krümmungsradius im Bereich einiger Millimeter. Wie in **Fig. 11** gezeigt, ergibt sich aus dieser starken Krümmung in der  $y$ - $z$ -Ebene eine erhebliche Randneigung des Reflektors gegenüber der Horizontalen, am Rand des 4 mm breiten Reflektors ergeben sich Neigungswinkel  $\beta$  von ca. 30 Grad. Diese Randneigung führt zu erheblichen Problemen bei der Beschichtung, die  
 25 für einen rotationssymmetrischen Körper homogen in der  $y$ - $z$ -Ebene sein muss (zusätzlich zu dem bereits erwähnten Schichtdickengradienten entlang  $x$  gemäß dem Stand der Technik und den dort beschriebenen enorm hohen Genauigkeitsanforderungen). Die für die Herstellung von Röntgenreflektoren verwendeten Beschichtungsverfahren, wie z.B. dem „Sputtern“ gemäß US  
 30 6,226,349, verwenden in der Regel Beschichtungsquellen mit mehr oder weniger gerichtetem Materialstrahl. Dies führt dazu, dass bei der Beschichtung geneigter oder verkippter Flächen entsprechend dem Neigungswinkel  $\beta$

weniger Material pro Flächeneinheit kondensiert als bei frontaler Beschichtung (Fig. 12, mit Beschichtungsquelle 120, Materialstrahl 121, Spiegelsubstrat 122 und Neigungswinkel  $\beta$ ). Beim Sputtern ergibt sich z.B. näherungsweise eine Schichtdickenverteilung, die mit  $\cos(\beta)$  variiert, wobei  $\beta$  gemäß

5  $\beta = \arctan(dz/dy)$  definiert ist (allgemeiner wird eine Abhängigkeit mit  $(\cos \beta)^n$  beobachtet, wobei  $n$  von Details des verwendeten

Beschichtungsprozesses abhängt; im Folgenden wird ohne Einschränkung der Allgemeinheit ein Prozess mit  $n = 1$  angenommen). In Fig. 13 ist gezeigt, dass der Reflektor bei einem derartigen Beschichtungsfehler die o.g. tolerierbaren  
10 Schichtdickenfehler von  $< 2\%$  nur über eine Breite von weniger als 2 mm erfüllt.

Detailliertere Untersuchungen mit Monte-Carlo-Verfahren (ray tracing), siehe Fig. 14 (Reflektivität für zwei Wellenlängen, Cu-K $\alpha$  und Cu-K $\beta$ , über die Fläche  
15 eines Reflektors von 60 x 4 mm<sup>2</sup> unter der Annahme eines  $\cos(\beta)$ -Beschichtungsfehlers; helle Punkte indizieren hohe Reflektivität), bestätigen dieses Ergebnis. Darüber hinaus zeigen derartige Untersuchungen, dass der Reflektor in den Randbereichen nicht nur die gewünschte Röntgenwellenlänge nicht mehr reflektiert (z.B. Cu K $\alpha$ , Fig. 14a), sondern in diesen Randbereichen  
20 aufgrund der abnehmenden Schichtdicken in unerwünschter Weise eine andere Wellenlänge zu reflektieren beginnt (z.B. Cu K $\beta$ , Fig. 14b). Der Reflektor verliert also neben der Intensität auch seine monochromatisierende Wirkung.

25 Für die Beschichtung eines solchen Reflektors ist es also notwendig, zusätzliche apparative Maßnahmen zur Homogenisierung der Schicht entlang der stark gekrümmten Fläche vorzunehmen. Zwei Möglichkeiten zur Homogenisierung der Schicht sind in Fig. 15 (Beschichtungsquelle 151, Materialstrom 152) skizziert. So kann man beispielsweise durch Bewegen einer  
30 Blende 153, oder durch geeignete Schwenk-, Pendel- oder andere Drehbewegungen des Spiegelsubstrats 154, oder eine Kombination dieser Maßnahmen dafür sorgen, dass die Schicht entlang der stark gekrümmten

Fläche homogen wird. Es ist jedoch nach wie vor notwendig, entlang der x-Richtung in ebenfalls extrem präziser Weise wie oben beschrieben den notwendigen Schichtdickengradient einzuhalten. Die Erfüllung dieser Bedingung in den i.w. ebenen Reflektoren nach dem Stand der Technik ist  
 5 bereits mit erheblichem apparativen Aufwand verbunden (siehe z.B. DE 19701419), da sie in der Regel neben mindestens einer Drehbewegung oder Blendenverschiebung auch Maßnahmen zur Stabilisierung der Temperatur oder anderer relevanter Parameter ohne Beeinträchtigung der meist hohen Qualität des Vakuums erforderlich macht. Für die kontrollierte Beschichtung  
 10 von stark gekrümmten Flächen ist wie beschrieben zusätzlich mindestens eine weitere Drehbewegung oder Blendenbewegung erforderlich. Der zusätzliche apparative Aufwand zur Einstellung all dieser Bedingungen bei der Beschichtung mit einer Präzision im Bereich einiger zehn Pikometer auf eine dreidimensional gekrümmte Fläche ist daher enorm hoch, und wurde bisher  
 15 unserer Kenntnis nach nicht realisiert.

Bei der erfindungsgemäßen Lösung entfällt die Notwendigkeit jeglicher Modifikation der bisher zur Beschichtung verwendeten Apparaturen. Beschichtungsanlagen, wie sie z.B. in Fig. 12 von US 6,226,349 zur Herstellung  
 20 von Röntgenreflektoren verwendet wurden, können ohne jegliche Veränderungen auch zur Herstellung der erfindungsgemäßen Reflektoren eingesetzt werden. Entsprechend der erfindungsgemäßen Lösung wird die Halbachse b derart gewählt, dass die oben beschriebenen Beschichtungsfehler bei nicht-normalem Einfall perfekt kompensiert werden. Dies wird im Folgenden  
 25 genauer beschrieben.

Das Rotationsellipsoid wird nun vorzugsweise in Zylinderkoordinaten dargestellt:

$$\frac{(x-a)^2}{a^2} + \frac{r^2}{b^2} = 1$$

30 mit  $z = r \cdot \cos \alpha$  und  $y = r \cdot \sin \alpha$ .

Damit ein rotationsellipsoider Spiegel optimal reflektiert, muss für die Beschichtungsdicke  $d$  gelten:

$$d(\alpha) = \text{const.}$$

5

Wenn ein Beschichtungsfehler auftritt, dann kann er durch Variation von  $b$  mit  $\alpha$  korrigiert werden. Aus dem Rotationsellipsoid wird dann das allgemeine, nicht-rotationssymmetrische Ellipsoid

$$10 \quad \frac{(x-a)^2}{a^2} + \frac{r^2}{b^2(\alpha)} = 1.$$

$b(\alpha)$  wird aus

$$d(f, \alpha) = \frac{\lambda \cdot b(\alpha) \cdot \sqrt{f \cdot f'}}{2 \cdot (b^2(\alpha) - \delta \cdot f \cdot f')}$$

15

berechnet [Veröff. Schuster s.o.]. Man erhält

$$b(\alpha) = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \sqrt{f \cdot f'}}{d(f, \alpha) \cdot 2} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \sqrt{f \cdot f'}}{d(f, \alpha) \cdot 2} \right)^2 + \delta \cdot f \cdot f'}.$$

20

$f$  ist der Abstand zwischen Quellfokus und dem betrachteten Spiegelsegment,  $f'$  ist der Abstand zwischen dem betrachteten Spiegelsegment und dem Bildfokus. Aufgrund der hohen Exzentrizität ( $a \gg b, c$ ) der hier betrachteten Reflektoren gilt  $f \approx x$  und  $f' \approx 2a - x$ .  $\delta$  ist der Dispersionskoeffizient der verwendeten Vielfachschicht (siehe z.B. US 6,226,349).

25

Ist jetzt beispielsweise die Ungleichmäßigkeit der Beschichtung wie oben beschrieben mit  $d(f, \alpha) = d_0(f) \cdot \cos \beta$  mit  $\beta = \arctan \frac{dz}{dy}$  beschreibbar, so ist die Winkelabhängigkeit der Ellipsenhalfachse  $b$  durch

$$b(\beta) = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \sqrt{f \cdot f'}}{d_0(f) \cdot \cos \beta \cdot 2} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \sqrt{f \cdot f'}}{d_0(f) \cdot \cos \beta \cdot 2} \right)^2 + \delta \cdot f \cdot f'}$$

beschreibbar.

- 5 Die Ellipsoidengleichung verändert sich dann zu

$$\frac{(x-a)^2}{a^2} + \frac{r^2}{\left( \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \sqrt{f \cdot f'}}{d_0(f) \cdot \cos \beta \cdot 2} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \sqrt{f \cdot f'}}{d_0(f) \cdot \cos \beta \cdot 2} \right)^2 + \delta \cdot f \cdot f'} \right)^2} = 1.$$

Für die weitere Analyse kann  $1 - \frac{(x-a)^2}{a^2} = \frac{r^2}{b_0^2}$  gesetzt werden. Es resultiert

- 10 dann die Gleichung

$$r_0 \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \sqrt{f \cdot f'}}{d_0(f) \cdot \cos \beta \cdot 2} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \sqrt{f \cdot f'}}{d_0(f) \cdot \cos \beta \cdot 2} \right)^2 + \delta \cdot f \cdot f'} \right) = r \cdot b_0$$

die nach  $\cos \beta$  aufgelöst

15

$$\cos \beta = \frac{1}{d_0(f)} \cdot \frac{\lambda \cdot r \cdot b_0 \cdot r_0 \cdot \sqrt{f \cdot f'}}{2 \cdot (r^2 \cdot b_0^2 - \delta \cdot f \cdot f' \cdot r_0^2)}$$

ergibt.

- 20 Für die Bestimmung der Querschnittsform  $z = f(y)$  wird eine numerische Lösung empfohlen - mit den Anfangsbedingungen  $\beta(0) = 0$  und  $z(0) = -r_0$ . Die Rechenvorschrift ist

$$\left( \frac{dz}{dy} \right)_i = \tan \beta_i$$



$$z_{i+1} = z_i + \left( \frac{dz}{dy} \right)_i \cdot \Delta y$$

$$y_{i+1} = y_i + \Delta y$$

$$\cos \beta_{i+1} = \frac{1}{d_0(f)} \cdot \frac{\lambda \cdot \sqrt{y_{i+1}^2 + z_{i+1}^2} \cdot b_0 \cdot r_0 \cdot \sqrt{f \cdot f'}}{2 \cdot \left( (y_{i+1}^2 + z_{i+1}^2) b_0^2 - \delta \cdot f \cdot f' \cdot r_0^2 \right)}$$

- 5 Verfeinerte numerische Lösungen nach bekannten Verfahren sind möglich. Ray tracing Simulationen zeigen jedoch, dass diese Lösung von ausreichender Genauigkeit ist.

- Das so errechnete Querschnittsprofil ist in **Fig. 16** gezeigt. Gegenüber der  
 10 rotationssymmetrischen Form ( $b = c = 5 \text{ mm}$ ) ist die hier beschriebene Form flacher und entspricht in guter Näherung einem Ellipsoid mit  $b = 6.4 \text{ mm}$  und  $c = 5 \text{ mm}$ . Ray tracing Rechnungen bestätigen, dass ein derart modifiziertes Ellipsoid trotz des Beschichtungsfehlers über den gesamten Querschnitt die gewünschte Röntgenlinie reflektiert, im Gegensatz zu Fig. 14a ohne Korrektur  
 15 des Beschichtungsfehlers. Die gewünschte monochromatisierende Wirkung bleibt ebenfalls vollständig erhalten, im Gegensatz zu Fig. 14b ohne Korrektur. Die flachere Form der erfindungsgemäßen Lösung hat darüber hinaus nur ungefähr die halbe Randneigung wie das rotationssymmetrische Ellipsoid. Daher ist zu erwarten, dass die Beschichtungsprobleme wie auch die  
 20 Fertigungsprobleme der gekrümmten Form mit der erforderlichen niedrigen Rauigkeit zusätzlich wesentlich reduziert werden. Die erfindungsgemäßen Reflektoren sind somit einfacher und billiger herzustellen.

- Analog zu der oben beschriebenen Vorgehensweise kann ein nicht-  
 25 rotationssymmetrisches Paraboloid berechnet werden, welches nun den Strahl nicht wie oben beschrieben fokussieren, sondern parallelisieren soll. Das Rotationsparaboloid mit dem Parabelparameter  $p$  wird vorzugsweise in Zylinderkoordinaten dargestellt:

30  $r^2 = 2 \cdot p \cdot x$

mit  $z = r \cdot \cos \alpha$  und  $y = r \cdot \sin \alpha$ .

Damit ein rotationsparaboloider Spiegel optimal reflektiert, muss für die Beschichtungsdicke  $d$  wieder gelten:

5

$$d(\alpha) = \text{const.}$$

Wenn ein Beschichtungsfehler auftritt, dann kann er durch Variation von  $p$  mit  $\alpha$  korrigiert werden. Aus dem Rotationsparaboloid wird dann das allgemeine,  
10 nicht-rotationssymmetrische Paraboloid

$$r^2 = 2 \cdot p(\alpha) \cdot x.$$

$p(\alpha)$  wird aus

15

$$d(f, \alpha) = \frac{\lambda \cdot \sqrt{2 \cdot p(\alpha) \cdot f}}{2 \cdot (p(\alpha) - 2 \cdot \delta \cdot f)}$$

berechnet [Veröff. Schuster s.o.]. Man erhält

$$20 \quad \sqrt{p(\alpha)} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \sqrt{2 \cdot f}}{d(f, \alpha) \cdot 2} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \sqrt{2 \cdot f}}{d(f, \alpha) \cdot 2} \right)^2 + 2 \cdot \delta \cdot f}.$$

Ist jetzt beispielsweise die Ungleichmäßigkeit der Beschichtung wieder mit

$d(f, \alpha) = d_0(f) \cdot \cos \beta$  mit  $\beta = \arctan \frac{dz}{dy}$  beschreibbar, so ist die

Winkelabhängigkeit des Parabelparameters  $p$  durch

25

$$\sqrt{p(\beta)} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \sqrt{2 \cdot f}}{d_0(f) \cdot \cos \beta \cdot 2} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \sqrt{2 \cdot f}}{d_0(f) \cdot \cos \beta \cdot 2} \right)^2 + 2 \cdot \delta \cdot f}$$

beschreibbar.

Die Paraboloidengleichung verändert sich dann zu

$$r^2 = 2 \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \sqrt{2 \cdot f}}{d_0(f) \cdot \cos \beta \cdot 2} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \sqrt{2 \cdot f}}{d_0(f) \cdot \cos \beta \cdot 2} \right)^2 + 2 \cdot \delta \cdot f} \right) \cdot x$$

5

Für die weitere Analyse kann  $x = \frac{r_0^2(x)}{2 \cdot p_0}$  gesetzt werden. Es resultiert dann die

Gleichung

$$r_0 \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \sqrt{2 \cdot f}}{d_0(f) \cdot \cos \beta \cdot 2} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \sqrt{2 \cdot f}}{d_0(f) \cdot \cos \beta \cdot 2} \right)^2 + 2 \cdot \delta \cdot f} \right) = r \cdot p_0,$$

10

die nach  $\cos \beta$  aufgelöst

$$\cos \beta = \frac{1}{d_0(f)} \cdot \frac{\lambda \cdot \sqrt{2 \cdot r \cdot p_0 \cdot r_0 \cdot f}}{2 \cdot (r \cdot p_0 - 2 \cdot \delta \cdot f \cdot r_0)}$$

15 ergibt.

Für die Bestimmung der Querschnittsform  $z = f(y)$  wird wieder eine numerische Lösung empfohlen - mit den Anfangsbedingungen  $\beta(0) = 0$  und  $z(0) = -r_0$ .

20 Die Rechenvorschrift ist

$$\left( \frac{dz}{dy} \right)_i = \tan \beta_i$$

$$z_{i+1} = z_i + \left( \frac{dz}{dy} \right)_i \cdot \Delta y$$

$$y_{i+1} = y_i + \Delta y$$

$$\cos \beta_{i+1} = \frac{1}{d_0(f)} \cdot \frac{\lambda \cdot \sqrt{2 \cdot \sqrt{y_{i+1}^2 + z_{i+1}^2} \cdot p_0 \cdot r_0 \cdot f}}{2 \cdot \left( \sqrt{y_{i+1}^2 + z_{i+1}^2} \cdot p_0 - 2 \cdot \delta \cdot f \cdot r_0 \right)}$$

Verfeinerte numerische Lösungen nach bekannten Verfahren sind möglich. Ray tracing Simulationen zeigen jedoch, dass die hier angegebene Lösung von  
5 ausreichender Genauigkeit ist.

Die beiden oben beschriebenen Vorgehensweisen sind nur exemplarisch zu verstehen, und für andere Beschichtungsfehler (z.B. parabolisch,  $(\cos \beta)^n$ ) und andere Reflektorformen (z.B. sphärisch, hyperboloid, ...) sind analoge  
10 Vorgehensweisen möglich.

Die gekrümmten Reflektorsubstrate können wie bei US 6,226,349 auf an sich bekannte Weise z.B. durch Schleifen, Polieren und Läppen von massiven Körpern aus Quarz, Zerodur, Glas, oder anderen Materialien angefertigt  
15 werden. Rauigkeiten unter 0.1 nm (schon 0.3 nm sind für Multilayer perfekt) sowie Krümmungsfehler unter 5  $\mu$ rad (unter 25  $\mu$ rad erhält man bereits sehr gute Spiegel) wurden bei den Reflektoren gemäß US 6,226,349 durch derartige Verfahren routinemäßig erreicht. Mit diesen Werten sind perfekte Strahleigenschaften erreicht worden. Weitere Techniken zur Formgebung der  
20 Reflektorssubstrate sind Biegetechniken [z.B. DE 19935513] oder Abform/Replikatechniken [US 4,525,853 claim 12].

Die Vorteile der erfindungsgemäßen Lehre können folgendermaßen zusammengefasst werden:

25

- a) Die Herstellung der Form wird einfacher, da man flachere Formen mit geringeren Krümmungen und Randwinkeln verwenden kann. Die flachere Form erleichtert auch das Polieren auf die niedrigere Rauigkeit.
- 30 b) Man kann durch die Wahl der Querschnittsform einen weiteren, günstigen Einfluss auf die Strahleigenschaften (Strahlabmessungen, Divergenz) nehmen,

z.B. einen breiteren Strahl erzeugen, je nach Anwendung. So ist es z.B. (anders als bei der Einkristalldiffraktometrie) bei der Bestimmung von mechanischen Spannungen oder Texturen von Werkstoffen mit röntgendiffraktometrischen Methoden durchaus erwünscht, eine größere

5 Probenfläche zu beleuchten. Durch die Wahl eines nicht-rotationssymmetrischen Reflektors hat man eine breitere Auswahl von anwendungsoptimierten Optiken zur Verfügung, man hat im Design der Optik eine größere Freiheit.

10 Speziell für Multilayer-Röntgenspiegel gilt außerdem:

c) Beschichtungsfehler in Querrichtung können durch die (freie!) Wahl der Querschnittsform des Körpers in dieser Richtung vollständig kompensiert werden. Die Beschichtung wird dann "sehr" einfach, oder erstmals möglich, mit denselben Techniken die zurzeit für die i.w. nur flach gekrümmten Optiken

15 verwendet werden.

d) Man bekommt (wesentlich) mehr Intensität, da man im Gegensatz zum Stand der Technik nur eine Reflektion benötigt wird (Intensitätsverlust pro Reflektion ca. 50 %), und da man eine größere Spiegelfläche verwenden kann.

20 Bei den Reflektoren nach dem Stand der Technik wird der Reflektor auf nur ca. 1mm Breite verwendet. Demgegenüber wurde hier bereits ein 4 mm breiter Reflektor beschrieben (ohne Einschränkung der Allgemeinheit). Zusammen kann man hier also schon einen Intensitätsgewinn um einen Faktor 8 erwarten.

25 e) Man braucht nur einen Spiegel, bei den Optiken gemäß dem Stand der Technik braucht man 2 Spiegel (Kostenfaktor).

f) Der Reflektor ist wesentlich einfacher zu justieren als eine Kirkpatrick-Baez-Anordnung nach dem Stand der Technik.

30

Wegen der besonders vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Reflektors als Goebelspiegel mit einer nicht-rotationssymmetrischen Krümmung quer zur x-Richtung (welche ungefähr der Haupteinstrahlrichtung der Röntgenstrahlung entspricht) soll im folgenden noch die Ausgestaltung einer solchen Ausführungsform bzw. eines zugehörigen Röntgenanalysegeräts im Detail erläutert werden.

Das solchermaßen bevorzugte, erfindungsgemäße Röntgenanalysegerät ist ausgestattet mit

- 10 - einer Röntgenstrahlung emittierenden Quelle,
- einer zu analysierenden Probe,
- einem auf Röntgenstrahlung ansprechenden Detektor,
- strahlformenden und/oder strahlbegrenzenden Mitteln, und
- einem gekrümmten Vielschicht-Bragg-Reflektor, der im Strahlgang zwischen
- 15 der Quelle und der Probe angeordnet ist und eine sich periodisch wiederholenden Folge von Schichten umfasst, wobei eine Periode aus mindestens zwei Einzelschichten A, B besteht, die unterschiedliche Brechungsindex-Dekremente  $\delta_A \neq \delta_B$  und die Dicken  $d_A$  und  $d_B$  besitzen,
- wobei die Periodendicke, also die Summe  $d = d_A + d_B + \dots$  der Einzelschichten
- 20 A, B, ... einer Periode entlang einer x-Richtung sich stetig ändert, und
- wobei der Reflektor derart gekrümmt ist, dass er eine Teilfläche eines Paraboloids oder Ellipsoids bildet, in dessen Brennpunkt bzw. Brennpunkt die Quelle oder ein Bild der Quelle liegt,
- wobei das Paraboloid oder Ellipsoid entlang eines Querschnitts in einer Ebene
- 25 senkrecht zur x-Richtung nicht-kreisbogenförmig gekrümmt ist, d.h. das Paraboloid bzw. Ellipsoid ist nicht ein Rotationsparaboloid bzw. ellipsoid, sondern ein nicht-rotationssymmetrisches Paraboloid bzw. Ellipsoid.

Weiterhin weisen die Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Röntgenanalysegeräts mit paraboloider Reflektorform die Eigenschaften auf,

- 30 - dass die Schichten des Reflektors direkt auf einer konkav gekrümmten Oberfläche eines paraboloidförmig ausgehöhlten Substrats aufgedampft, aufgesputtert oder aufgewachsen sind, wobei die Krümmung der konkaven

Substratoberfläche in einer xz-Ebene der Formel  $z^2 = 2px$  folgt mit  $0,02 \text{ mm} < p < 0,5 \text{ mm}$ , vorzugsweise  $p \approx 0,1 \text{ mm}$ ;

- dass die dem Reflektor zugewandte konkave Substratoberfläche eine maximal zulässige Formabweichung von  $\Delta p = \sqrt{2px} \cdot \Delta\Theta_R$  aufweist, wobei

5  $\Delta\Theta_R$  die Halbwertsbreite des Bragg-Reflexes des Reflektors ist, und im Bereich  $0,01^\circ < \Delta\Theta_R < 0,5^\circ$ , vorzugsweise  $0,02^\circ < \Delta\Theta_R < 0,20^\circ$  liegt,

- dass die dem Reflektor zugewandte konkave Substratoberfläche eine maximale zulässige Welligkeit von  $\frac{\Delta z}{\Delta x} = \frac{1}{2} \Delta\Theta_R$  aufweist,

- dass die dem Reflektor zugewandte konkave Substratoberfläche eine

10 maximal zulässige Rauigkeit von  $\Delta z = \frac{d}{2\pi}$ , vorzugsweise  $\Delta z \leq 0,3 \text{ nm}$  aufweist,

- dass die Röntgenstrahlung unter einem Einfallswinkel  $0^\circ \leq \Theta \leq 5^\circ$  auf die gekrümmte Oberfläche des Reflektors trifft,

- dass sich die Periodendicke  $d$  derart entlang der x-Richtung ändert, dass die

15 Röntgenstrahlung einer bestimmten Wellenlänge  $\lambda$  einer punktförmigen Röntgenquelle unabhängig vom Auftreffpunkt  $(x, z)$  auf dem Reflektor stets Bragg-Reflexion erfährt, indem die Periodendicke  $d$  zur Paraboloidöffnung hin

in x-Richtung gemäß  $d = \frac{\lambda}{2} \frac{1}{(1 - \bar{\delta} / \sin^2 \Theta) \sin \Theta}$  und  $\Theta = \arccot \frac{\sqrt{2px}}{p}$  zunimmt,

wobei  $\bar{\delta}$  das Dekrement des mittleren Brechungsindex des Vielschicht-Bragg-  
20 Reflektors ist,

- dass die Abweichung  $\Delta d / \Delta x$  der Periodendicke  $d$  an jedem Punkt des

Vielschicht-Bragg-Reflektors entlang der x-Richtung kleiner ist als  $\frac{\Delta d}{\Delta x} = \frac{1}{2} \frac{d}{x}$ ,

- dass für die Periodendicke  $d$  gilt:  $1 \text{ nm} \leq d \leq 20 \text{ nm}$ ,

- dass für die Anzahl  $N$  der Perioden gilt  $10 < N < 500$ , vorzugsweise  $50 \leq N \leq$

25 100,

- und dass für die Energie  $E$  der Lichtquanten der Röntgenstrahlung gilt:

$0,1 \text{ keV} < E < 0,1 \text{ MeV}$ .

Vorteilhaft ist weiterhin die Verwendung von amorphem oder polykristallinem Substratmaterial, insbesondere von Glas, amorphem Si, polykristallinem Keramikmaterial oder Kunststoff. Bezüglich der Anzahl der Einzelschichten pro Periode sind 2, 3 oder 4 Schichten besonders empfehlenswert. Die

- 5 Schichtdicken der Einzelschichten unterscheiden sich von Material zu Material bevorzugt um maximal 5%.

- Konventionelle (rotationssymmetrische) Goebel-Spiegel nach dem Stand der Technik sind beispielsweise in DE 198 33 524 A1 beschrieben, worauf hiermit  
10 vollinhaltlich verwiesen wird.



### Patentansprüche

- 5        1. Reflektor (5) für Röntgenstrahlung (2, 3, 10, 11), welcher entlang eines  
ersten Querschnitts (13) in einer eine x-Richtung enthaltenden Ebene  
(XZ) nicht-kreisbogenförmig gekrümmt ist, wobei der Reflektor (5) auch  
entlang eines zweiten Querschnitts (14) in einer zur x-Richtung  
senkrechten Ebene (YZ) gekrümmt ist,
- 10        dadurch gekennzeichnet,
- dass der Reflektor (5) entlang des zweiten Querschnitts (14) ebenfalls  
eine von einem Kreisbogen abweichende Krümmung aufweist.
- 15        2. Reflektor (5) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die  
Krümmung des Reflektors (5) entlang des zweiten Querschnitts (14) die  
Fokussiereigenschaften des Reflektors (5), insbesondere in der zur x-  
20        Richtung senkrechten Ebene (YZ), einstellt.
3. Reflektor (5) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch  
gekennzeichnet, dass der Reflektor (5) zweidimensional fokussierend  
oder parallelisierend ist.
- 25        4. Reflektor (5) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch  
gekennzeichnet, dass der Reflektor (5) entlang des ersten Querschnitts  
(13) parabelförmig, hyperbelförmig oder elliptisch gekrümmt ist.
- 30

5. Reflektor (5) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Reflektor (5) eine periodisch sich wiederholende Folge von Schichten aus Materialien A, B, ... mit unterschiedlichem Brechungsindex aufweist, wobei die Summe  $d = d_A + d_B + \dots$  der Dicken  $d_A, d_B, \dots$  aufeinanderfolgender Schichten der Materialien A, B, ... sich entlang der x-Richtung stetig, insbesondere monoton ändert.
6. Reflektor (5) nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Summe  $d$  sich entlang des zweiten Querschnitts (14) ändert, insbesondere um mehr als 2%.
7. Reflektor (5) nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Krümmung des Reflektors (5) entlang des zweiten Querschnitts (14) die Änderung der Summe  $d$  entlang des zweiten Querschnitts (14) gegenüber einem Vergleichsreflektor mit einer konstanten Summe  $d$  und kreisförmiger Krümmung entlang dessen zweiten Querschnitts bezüglich der Fokussierungs- und Reflektivitäts-Eigenschaften des Reflektors (5) kompensiert.
8. Reflektor (5) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Reflektor (5) entlang des zweiten Querschnitts (14) eine elliptische Krümmung mit unterschiedlichen Längen der Halbachsen oder eine parabelförmige Krümmung aufweist.
9. Reflektor (5) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Reflektor (5) eine reflektierende Oberfläche von mehr als 2 mm, vorzugsweise mindestens 4 mm Breite (gemessen senkrecht zur x-Richtung) aufweist.

10. Röntgenanalysegerät mit einer Röntgenquelle (1), einer zu analysierenden Probe (6), einem Röntgendetektor (7), strahlformenden und/oder strahlbegrenzenden Mitteln (4) und einem Reflektor (5) nach einem der vorhergehenden Ansprüche.

5

11. Röntgenanalysegerät nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass Röntgenstrahlung (2, 3; 10, 11) auf dem Reflektor (5) in einem Winkel (9) von weniger als  $5^\circ$  zur x-Richtung auftrifft.

10



12. Röntgenanalysegerät nach einem der Ansprüche 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Krümmung des Reflektors (5) entlang des zweiten Querschnitts (14) so ausgebildet ist, dass die Reflektivität des Reflektors (5) für die Wellenlänge der von der Röntgenquelle (1) erzeugten Strahlung maximal ist.

15

13. Röntgenanalysegerät nach einem der Ansprüche 10 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Reflektor (5) auf ihn einfallende Röntgenstrahlung (2, 3; 10, 11) auf einen punktförmigen Bereich (Brennfleck), insbesondere auf die Probe (6) oder auf den Röntgendetektor (7) fokussiert.

20



14. Röntgenanalysegerät nach einem der Ansprüche 10 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Reflektor (5) aus auf ihn einfallender Röntgenstrahlung (2, 3; 10, 11) einen Röntgenstrahl mit einer bestimmten Strahldivergenz, insbesondere einen Parallelstrahl, erzeugt.

25

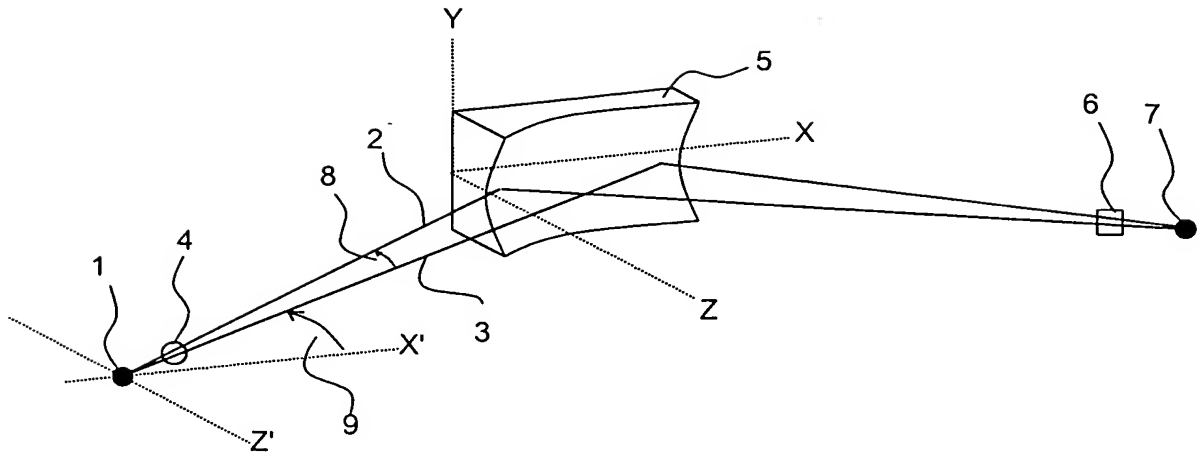


Fig. 1a

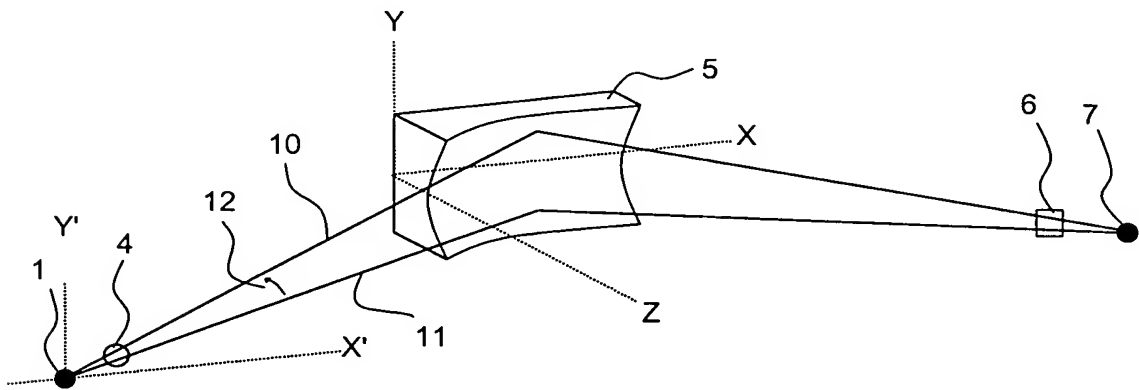


Fig. 1b

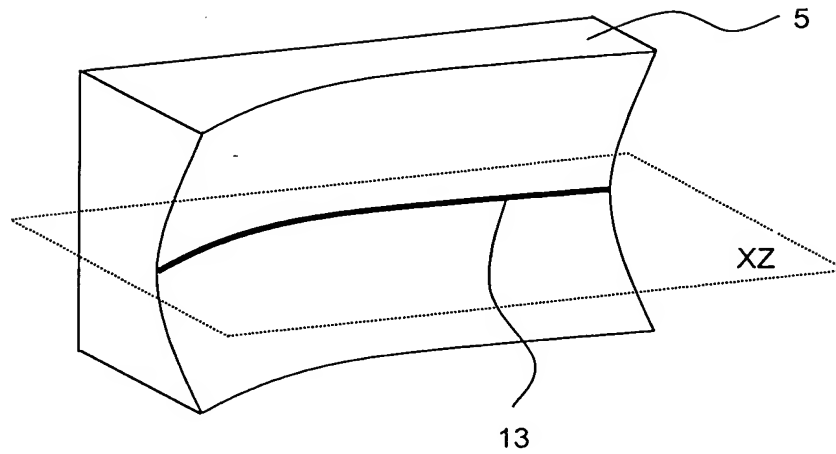


Fig. 2a

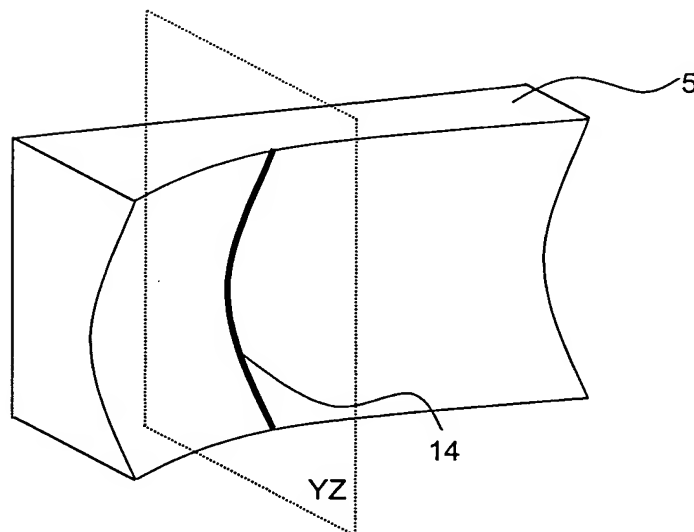


Fig. 2b

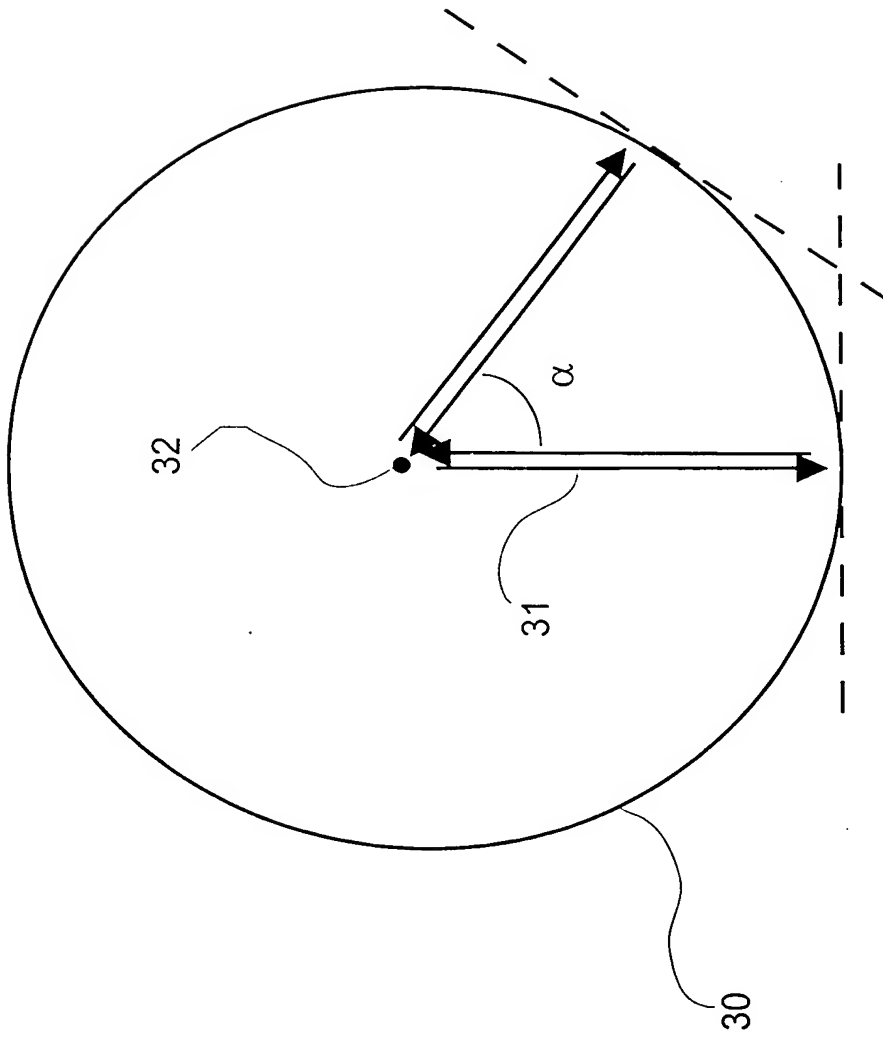


Fig. 3

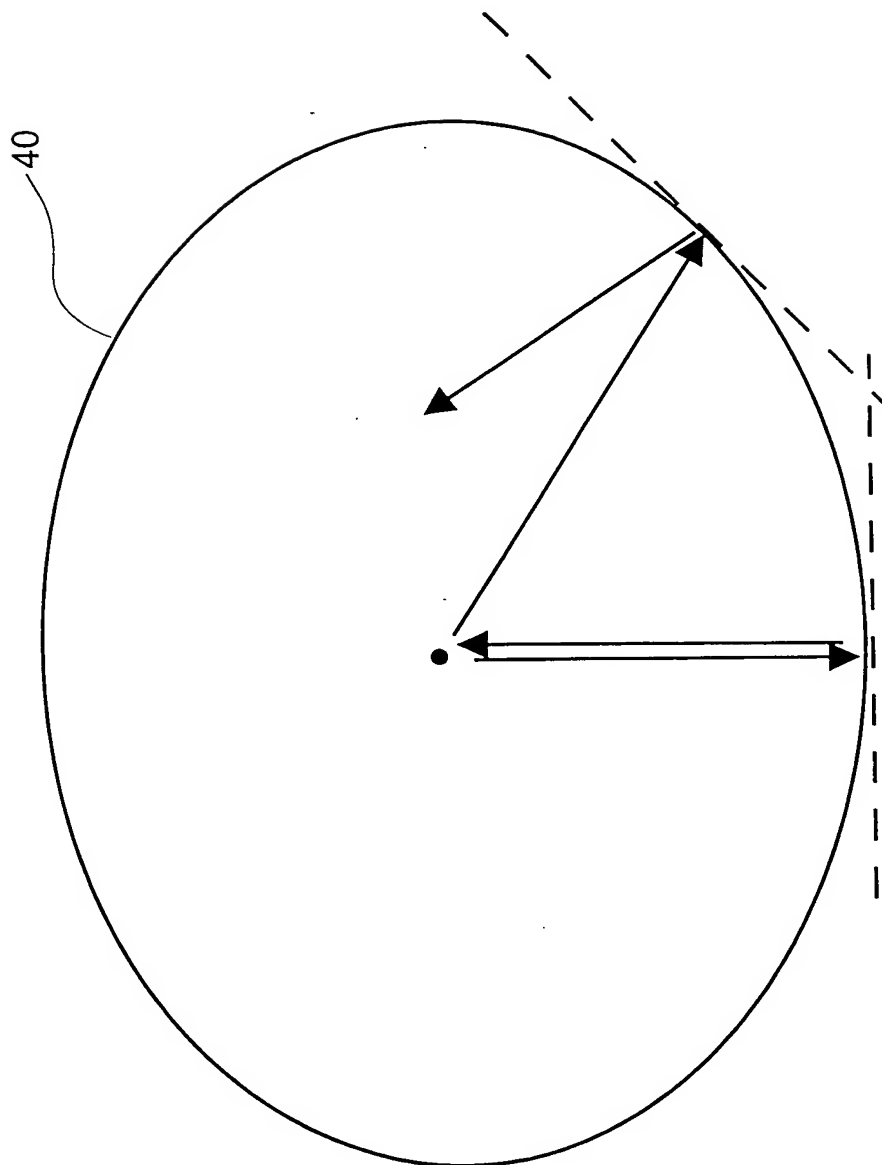


Fig. 4

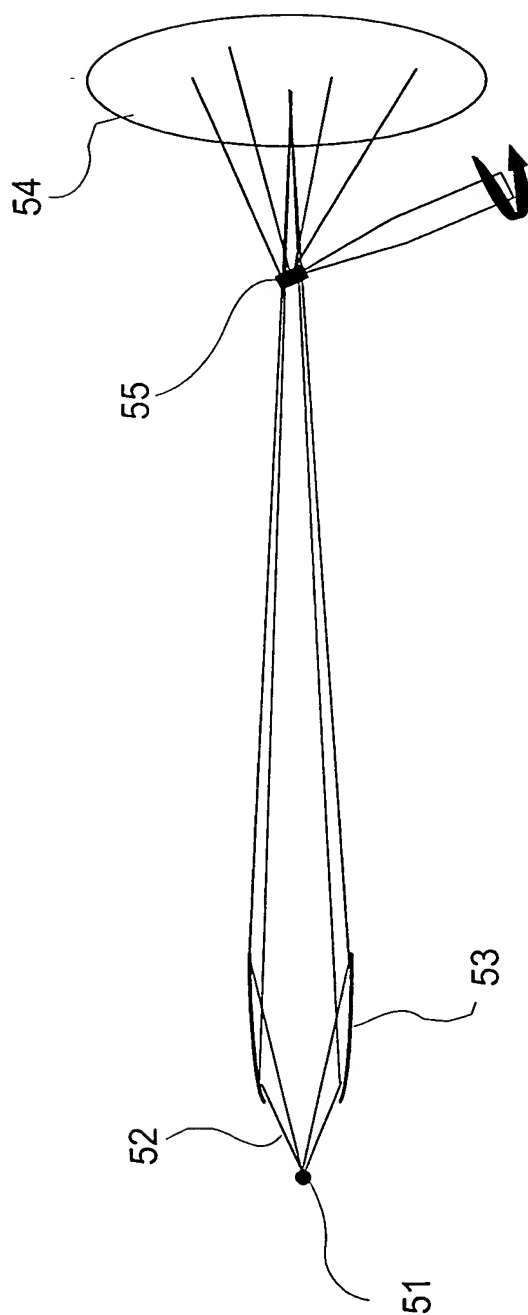


Fig. 5



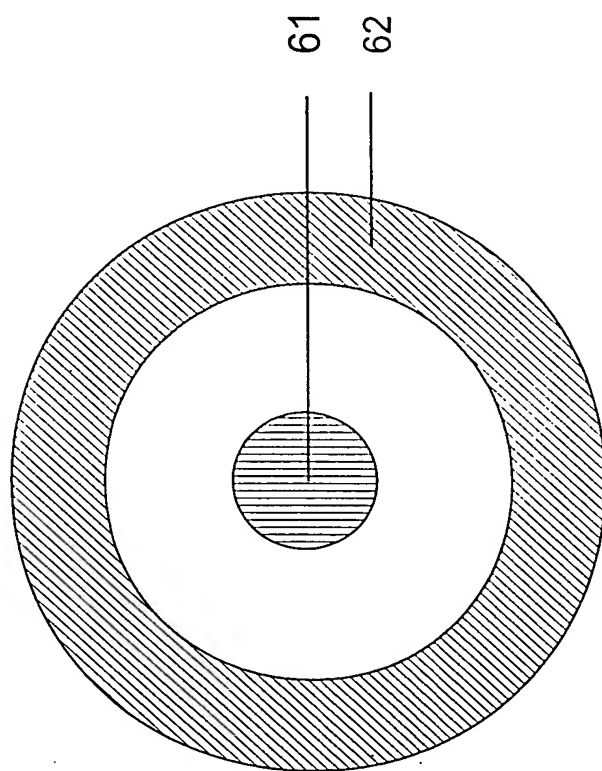


Fig. 6

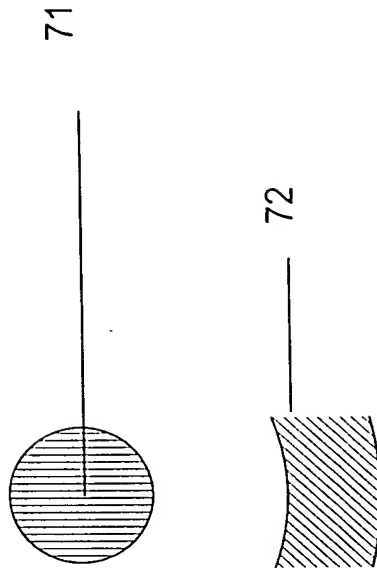
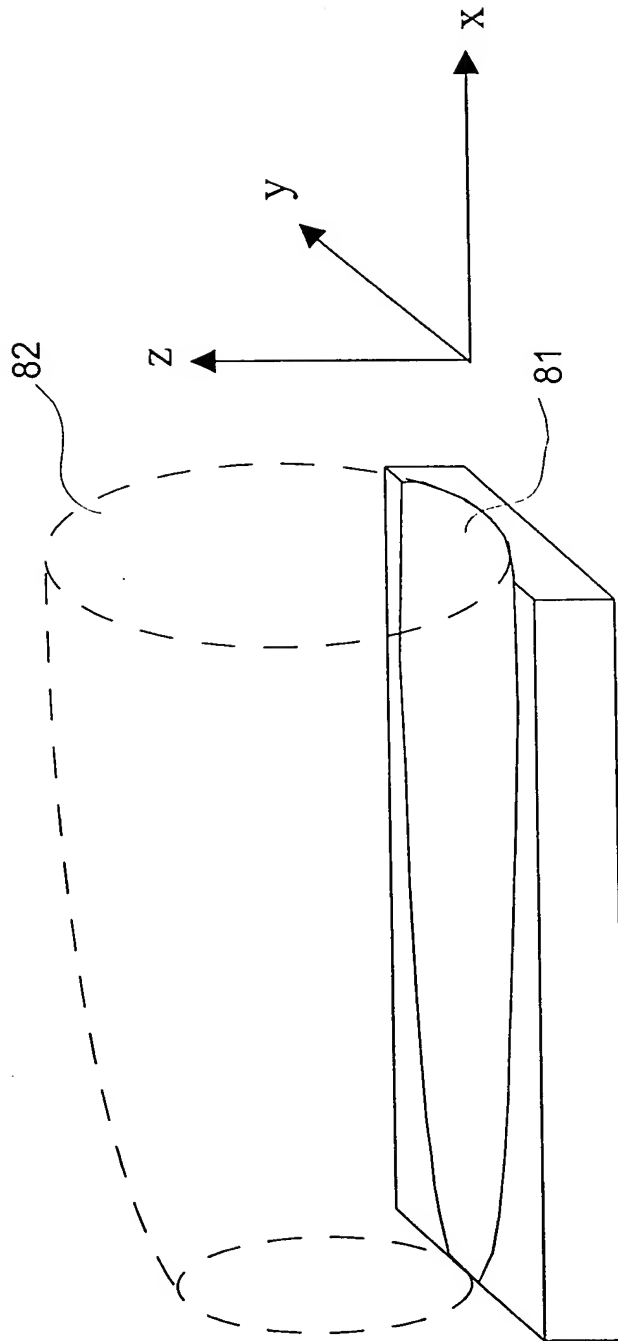


Fig. 7

Fig. 8



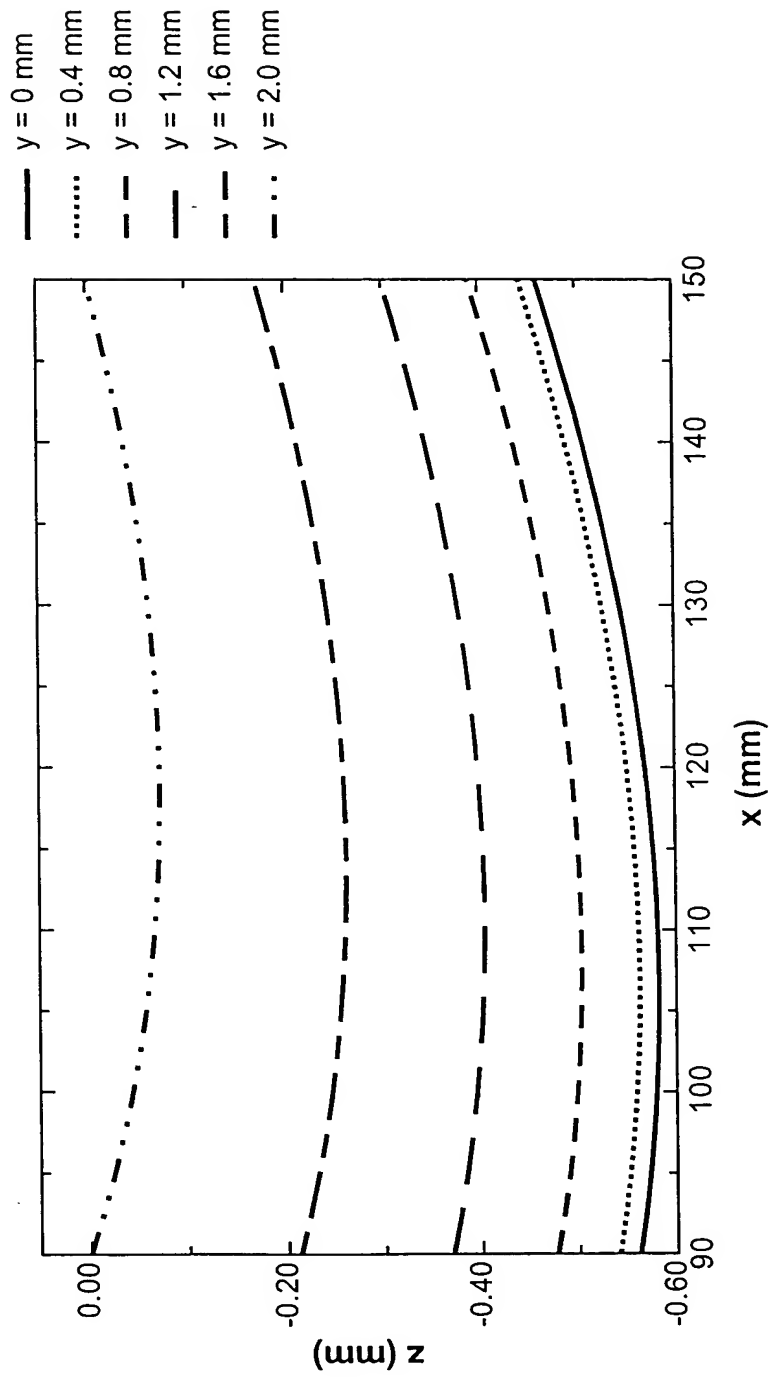


Fig. 9

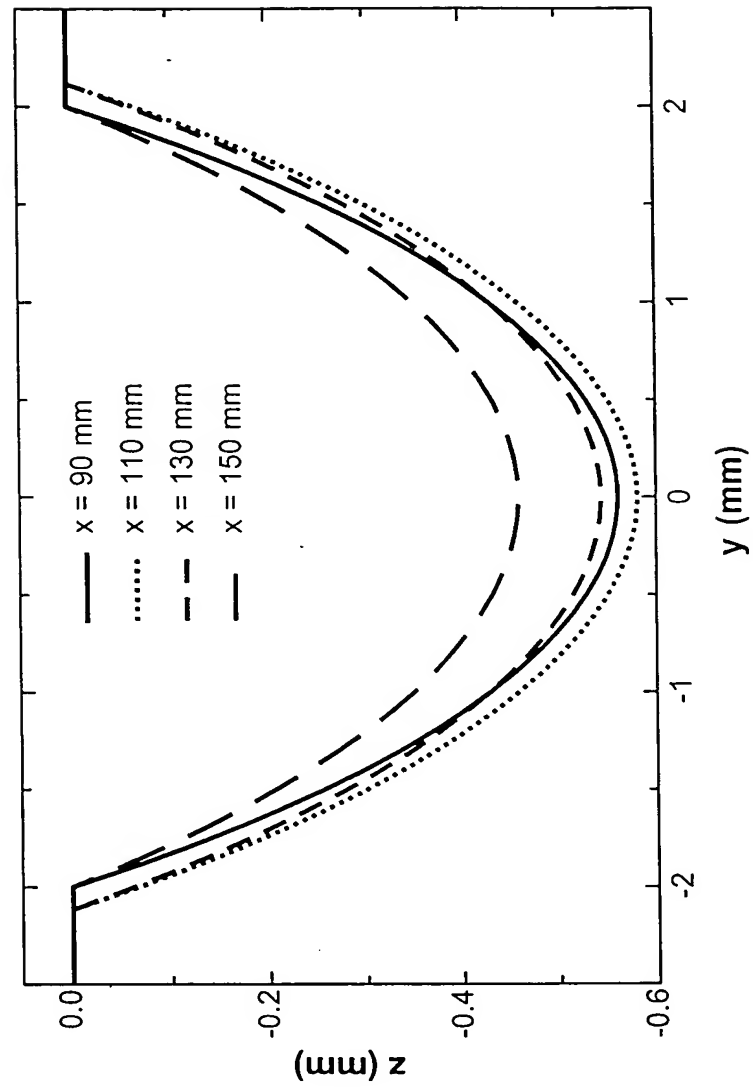


Fig. 10

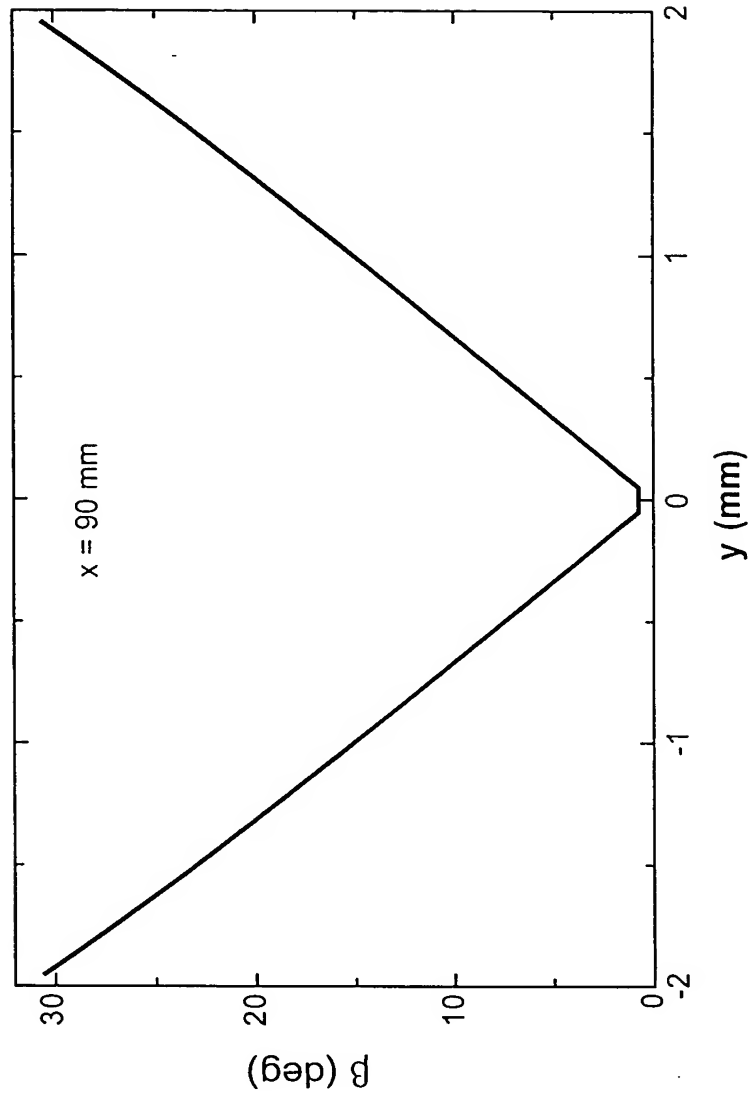


Fig. 11

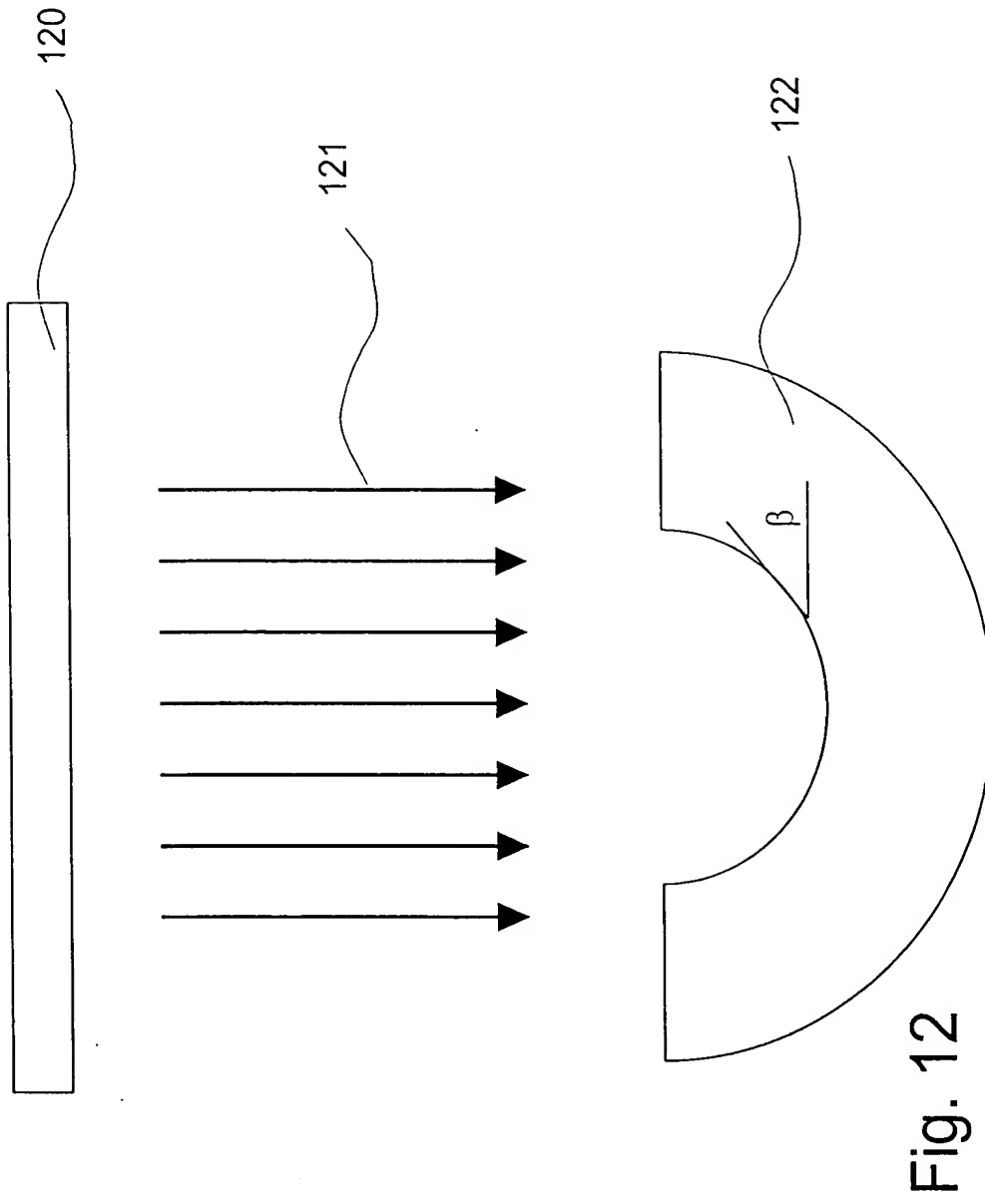


Fig. 12

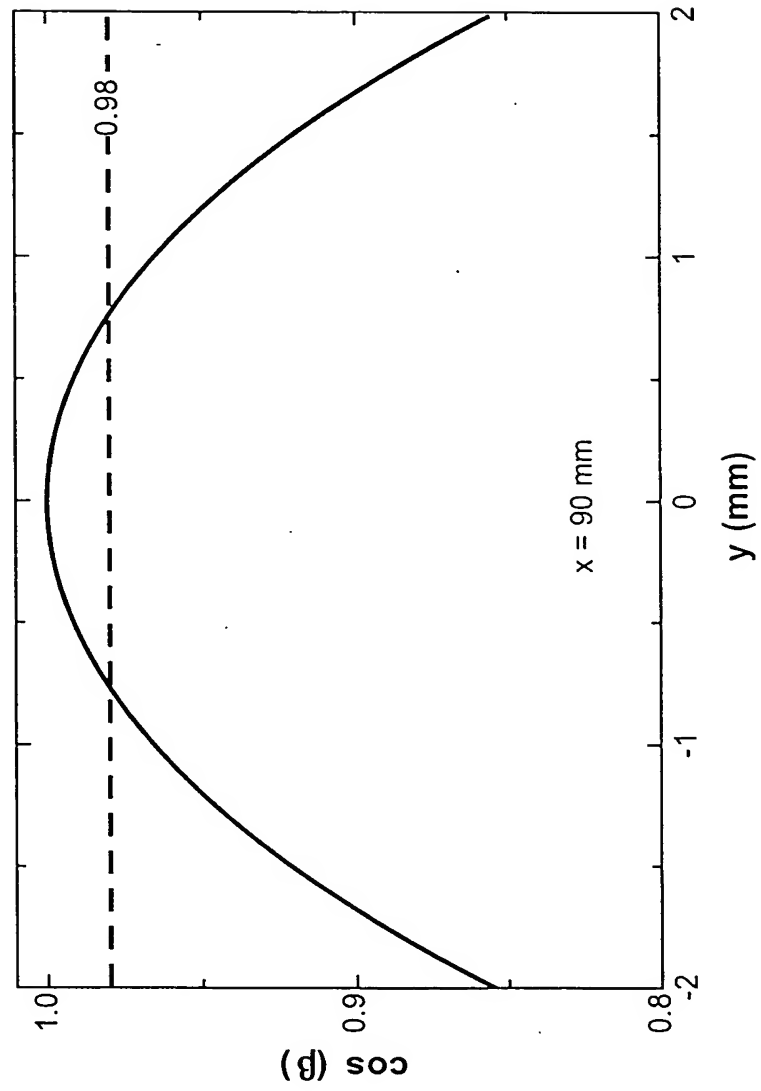


Fig. 13



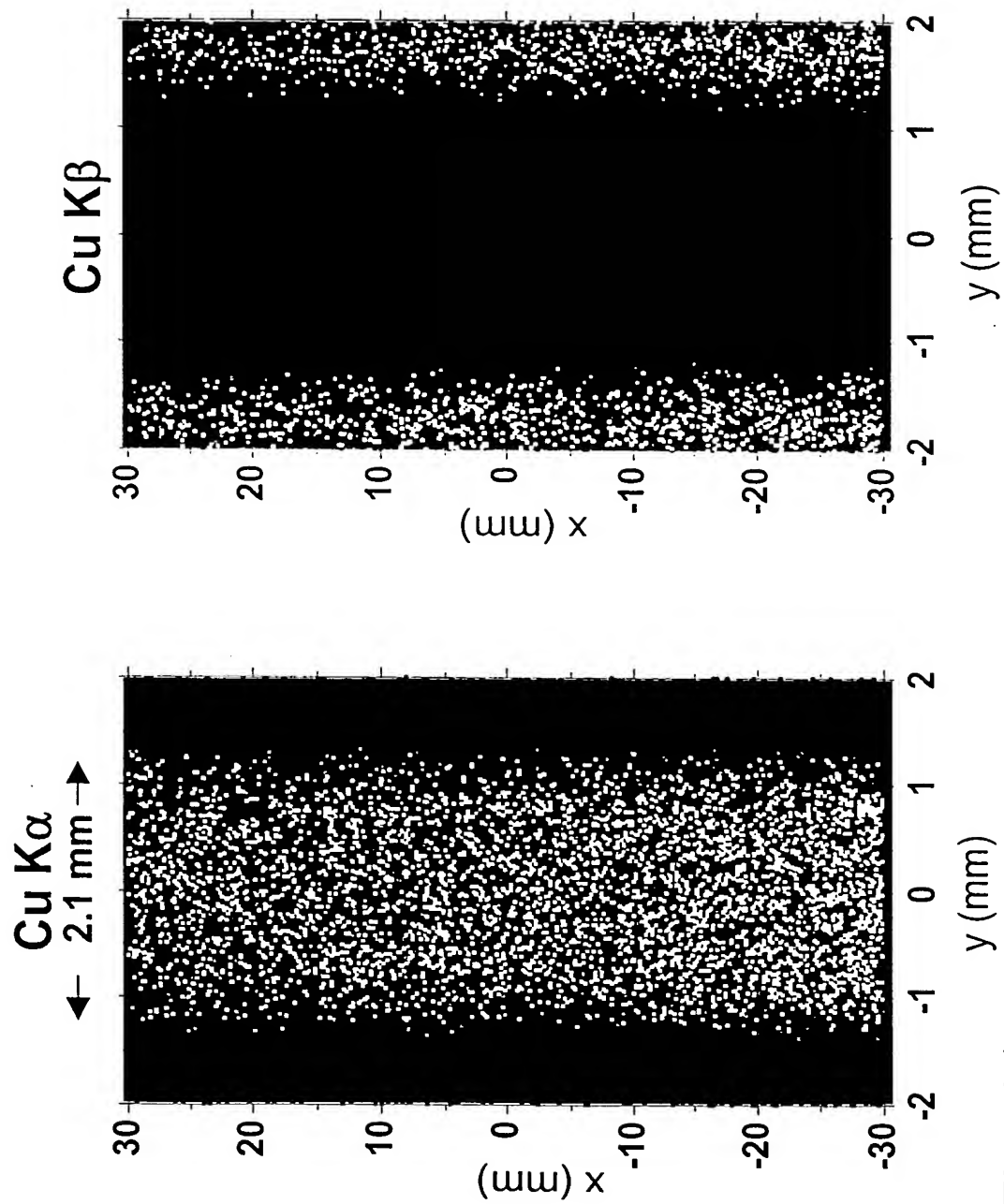


Fig. 14

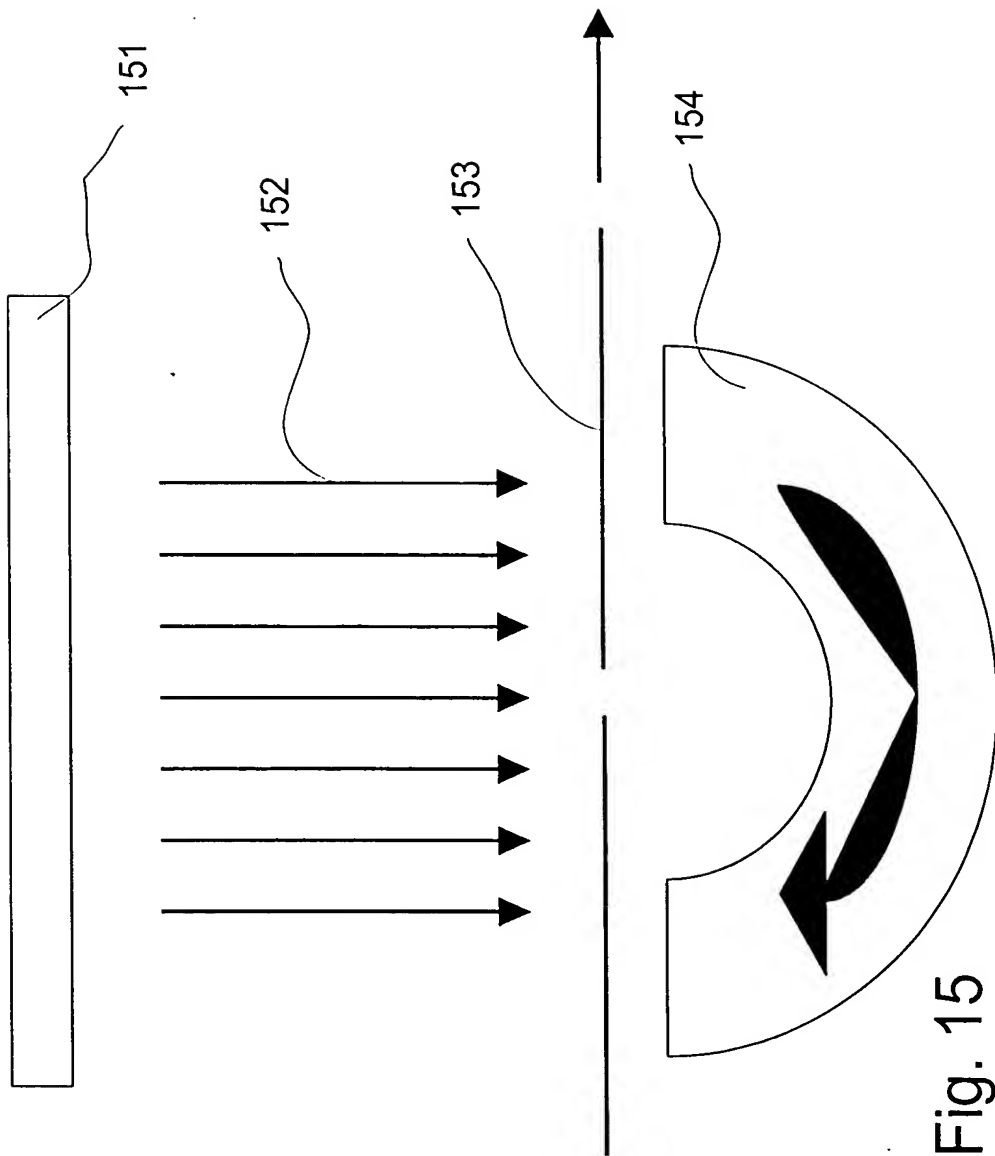


Fig. 15

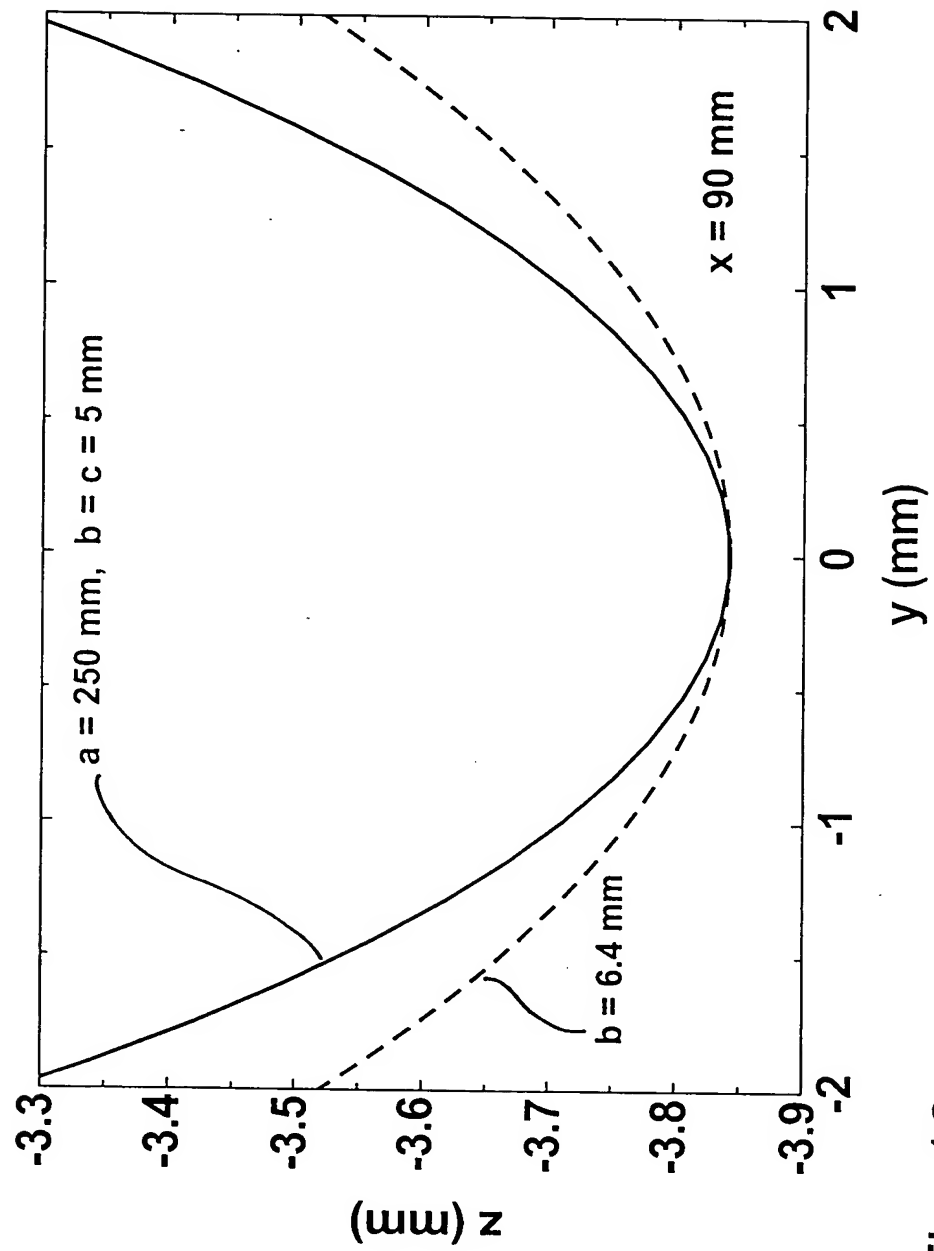


Fig. 16

### Zusammenfassung

Ein Reflektor (5) für Röntgenstrahlung (2, 3, 10, 11), welcher entlang eines ersten Querschnitts (13) in einer eine x-Richtung enthaltenden Ebene (XZ) nicht-kreisbogenförmig gekrümmt ist, wobei der Reflektor (5) auch entlang eines zweiten Querschnitts (14) in einer zur x-Richtung senkrechten Ebene (YZ) gekrümmt ist, ist dadurch gekennzeichnet, dass der Reflektor (5) entlang des zweiten Querschnitts (14) ebenfalls eine von einem Kreisbogen abweichende Krümmung aufweist. Dadurch wird das Design von Röntgenspiegeln und das Strahlprofil von reflektierter Röntgenstrahlung flexibilisiert, die Fertigung von Röntgenspiegeln erleichtert und dabei gleichzeitig ein hohes Reflexionsvermögen und gute Fokussierungseigenschaften von Röntgenspiegeln verfügbar.  
(Fig. 1b)

15

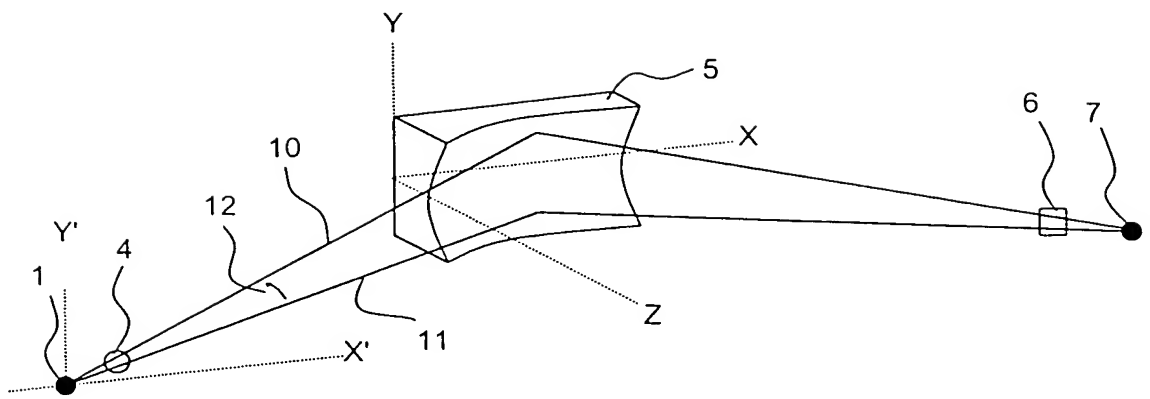


Fig. 1b